

© Соломонов Ю.С., Сухорученков Б. И.

## МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТРЕБОВАНИЙ К ГАРАНТИРОВАННОЙ ВЕРОЯТНОСТИ БЕЗОТКАЗНОЙ РАБОТЫ ЭЛЕМЕНТОВ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

*Приводится краткий анализ форм задания требований к вероятности безотказной работы (ВБР) технических систем (ТС) и их элементов (подсистем). Показана эффективность задания требований в форме гарантированной ВБР. Предложена методика определения требований к средней гарантированной ВБР подсистем на основе заданных требований к гарантированной ВБР ТС. Приводятся рекомендации по сокращению объемов отработочных испытаний элементов и ТС для подтверждения требуемой ВБР ТС.*

### 1. Постановка задачи

Эффективность целевого использования технических систем (ТС) зависит от их безотказности, основным показателем которой является вероятность безотказной работы (ВБР) за период целевого функционирования ТС. Поэтому к ВБР ТС предъявляются высокие требования, которые могут задаваться в виде двух форм [1, 2]:

*первая форма:* задается требуемый ожидаемый уровень ВБР  $P_{mp}$  и требуемое среднеквадратическое отклонение (СКО)  $\sigma_{mp}$  оценки ВБР для подтверждения требуемой ВБР;

*вторая форма:* задается требуемый гарантированный уровень ВБР в виде нижнего допустимого предела  $P_{nmp}$  и требуемая доверительная вероятность  $\gamma_{mp}$  для подтверждения требуемой ВБР.

Указанные формы предполагают соответствующие правила контроля соответствия ВБР ТС требованиям. При задании требований по первой форме необходимо определить ВБР в виде точечной оценки  $\bar{P}$  и ее СКО  $\sigma_{\bar{P}}$ . Наиболее достоверно ВБР оценивается на основе натуральных испытаний, хотя может привлекаться и дополнительная информация о надежности элементов ТС и ее аналогов. Решение о ВБР принимается по правилу:

ВБР соответствует требуемой, если выполняются следующие условия

$$\bar{P} \geq P_{mp} \text{ и } \sigma_{\bar{P}} \leq \sigma_{mp}; \quad (1)$$

ВБР не соответствует требуемой, если

$$\bar{P} < P_{mp} \text{ и } \sigma_{\bar{P}} \leq \sigma_{mp}. \quad (2)$$

При  $\sigma_{\bar{P}} > \sigma_{mp}$  решение принять нельзя, в этом случае необходимо повышать точность оценки ВБР.

Для контроля соответствия ВБР ТС требованиям, заданным по второй форме, необходимо определить оценку нижней доверительной границы  $\bar{P}_n$  для ВБР, соответствующую доверительной вероятности  $\gamma_{mp}$ . Решение о ВБР принимается по правилу:

ВБР соответствует требуемой, если выполняется следующее условие

$$\bar{P}_n \geq P_{nmp}. \quad (3)$$

При  $\bar{P}_n < P_{nmp}$  решение принять нельзя, так как это неравенство возможно как при несоответствии ВБР требованиям, так и при недостаточной точности оценивания ВБР (например, при малом объеме испытаний).

При создании сложной ТС, состоящей из нескольких подсистем, для достижения заданной заказчиком требуемой ВБР генеральный конструктор должен определить соответствующие требования к ВБР подсистем. Для этого используются так называемые методы нормирования надежности подсистем с учетом технических возможностей и затрат на достижение требуемой ВБР каждой подсистемы. В настоящее время разработаны методы решения этой задачи только при задании требований к ВБР по первой форме.

*Соломонов Юрий Семёнович – Генеральный директор–Генеральный конструктор ФГУП «МИТ», академик РАН, доктор технических наук, профессор;*

*Сухорученков Борис Иванович – профессор, доктор технических наук, профессор кафедры баллистических ракет военной академии РВСН имени Петра Великого.*

В работе [3] показано, что из двух форм задания требований к ВБР более предпочтительной является вторая форма, так как при этом снижается объем испытаний для подтверждения требуемой ВБР и уменьшается риск ошибочных решений. Основным препятствием для практического применения этой формы задания требований к ВБР является отсутствие математического аппарата для пересчета требований к гарантированной ВБР ТС в требования к гарантированному уровню ВБР подсистем. Обоснование методики определения требований к гарантированному уровню ВБР подсистем и сравнение эффективности разных форм задания требований к ВБР ТС и их подсистем излагается далее.

**2. Определение требований к ожидаемому уровню ВБР подсистем**

Рассмотрим ТС, состоящую из  $J$  подсистем. При этом для выполнения целевой задачи все подсистемы должны проработать безотказно. Это соответствует структурной схеме надежности (СШ) ТС с последовательным соединением элементов (рис.1).

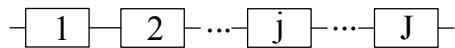


Рис. 1. Структурная схема надежности ТС

Вероятность безотказной работы ТС  $P$  зависит от числа подсистем и их ВБР  $P_j$  и определяется по зависимости

$$P = \prod_{j=1}^J P_j. \tag{4}$$

Рассмотрим следующую задачу. Заказчиком заданы требования к ВБР ТС по первой форме:  $P_{mp}$  и  $\sigma_{mp}$ . Необходимо определить соответствующие требования к ВБР подсистем:  $P_{j\,mp}$  и  $\sigma_{j\,mp}$ ,  $j = 1, \dots, J$ . Поставленная задача является некорректной, так как число неизвестных параметров превышает число уравнений, связывающих эти параметры. Поэтому на начальном этапе создания ТС приближенные значения требований к ВБР подсистем определяются на основе использования принципа одинаковой надежности подсистем. В дальнейшем требования уточняются с использованием методов нормирования надежности подсистем на основе анализа и прогнозирования возможностей и затрат для достижения и подтверждения требуемых показателей надежности. Рассмотрим определение требуемых значений ВБР подсистем на основе предположения, что ВБР подсистем одинаковы. В этом случае в соответствии с соотношением (4) требуемые ВБР подсистем вычисляются по зависимости

$$P_{j\,mp} = (P_{mp})^{1/J}, j = 1, \dots, J. \tag{5}$$

Рассмотрим определение требуемых значений СКО для подтверждения ВБР подсистем. Если оценки ВБР подсистем  $\bar{P}_j$  и их СКО определяются независимо друг от друга, то оценка ВБР ТС и ее СКО определяются по методу линеаризации с учетом (4)

$$\bar{P} = \prod_{j=1}^J \bar{P}_j; \quad \sigma_{\bar{P}}^2 = \bar{P}^2 \sum_{j=1}^J \frac{\sigma_{\bar{P}_j}^2}{\bar{P}_j^2}. \tag{6}$$

Если ВБР ТС и подсистем соответствуют требованиям ( $P = P_{тр}$ ,  $P_j = P_{j\,тр}$ ), то на основе (6) можно определить соотношение между требуемыми значениями СКО оценок ВБР ТС и подсистем

$$\sigma_{mp}^2 = P_{mp}^2 \sum_{j=1}^J \frac{\sigma_{j\,mp}^2}{P_{j\,mp}^2}. \tag{7}$$

Определить требуемые значения СКО по одному уравнению (7) без дополнительных условий невозможно. Для решения задачи допустим, что для всех подсистем требуемые СКО одинаковы. В этом случае на основе (7) можно определить требуемое значение СКО для подтверждения требуемой ВБР подсистем при заданных требованиях к ВБР ТС

$$\sigma_{j\,mp} = \frac{\sigma_{mp}}{P_{mp}^{1/J} \sqrt{J}}, j = 1, \dots, J. \tag{8}$$

Для подтверждения требуемой ВБР подсистем, полученной по зависимости (5) с требуемой точностью (8) в соответствии с правилом (1), необходим большой объем информации, в частности, большое число автономных испытаний (АИ) подсистем на надежность, что исследуется далее.

**3. Анализ числа испытаний подсистем для подтверждения требуемой ожидаемой ВБР**

Для подтверждения требуемой ВБР подсистем, полученной по методике п. 2, необходимо определить оценки ВБР  $\bar{P}_j$  и их СКО  $\sigma_{\bar{P}_j}$ . Наиболее достоверно ВБР подсистем оценивается по результатам их автономных испытаний (АИ). Рассмотрим АИ  $j$ -й подсистемы на надежность в объеме  $n_j$ , при которых может быть зафиксировано  $m_j$  случайных отказов. По этим результатам наиболее точная оценка ВБР подсистемы и ее дисперсия вычисляются по методу несмещенных оценок (МНО) [4] по зависимостям

$$\bar{P}_j = \frac{n_j + 1 - m_j}{n_j + 2}; \quad \sigma_{\bar{P}_j}^2 = \frac{(m_j + 1)(n_j + 1 - m_j)}{(n_j + 2)^2 (n_j + 3)}, j = 1, \dots, J. \tag{9}$$

Для принятия положительного решения о соответствии ВБР подсистемы требованиям в соответствии с правилом (1) с учетом (9) необходимо выполнить следующие условия:

для обеспечения  $\bar{P}_j \geq P_{j\text{mp}}$ :

$$\frac{n_{j1} + 1 - m_j}{n_{j1} + 2} \geq \bar{P}_{j\text{mp}}; \quad (10)$$

для обеспечения  $\sigma_{\bar{P}_j} \leq \sigma_{j\text{mp}}$ :

$$\frac{(m_j + 1)(n_{j2} + 1 - m_j)}{(n_{j2} + 2)^2 (n_{j2} + 3)} \leq \sigma_{j\text{mp}}^2. \quad (11)$$

На основе условий (10) и (11) можно определить два значения для числа испытаний, необходимых для подтверждения требуемой ВБР подсистемы:  $n_{j1}$  и  $n_{j2}$ . Так как условия (10) и (11) должны выполняться одновременно, то требуемое число автономных испытаний должно соответствовать максимальной величине из двух значений

$$n_{j\text{mp}} \neq \max\{n_{j1}; n_{j2}\}, j \neq 1, \dots, J. \quad (12)$$

Требуемое число испытаний для каждой подсистемы определяется на основе соотношений (10) и (11) численным методом.

Проведем исследования требуемого числа автономных испытаний подсистем при следующих условиях. Число подсистем  $J \in [5; 10]$ , требуемая ВБР ТС  $P_{\text{mp}} \in [0,95; 0,97]$ , требуемая точность подтверждения ВБР в соответствии с ГОСТ [1]  $\sigma_{\text{mp}} \in [0,05; 0,06]$ . Предполагается, что в случае отказов подсистем при испытаниях причины отказов устанавливаются и проводятся эффективные доработки. Поэтому число случайных отказов, причины которых не выявлены и поэтому доработки не проведены, ограничено значениями  $m_j \in [0; 1]$ .

Результаты вычислений требуемых значений ВБР подсистем и требуемых СКО оценок ВБР для их подтверждения по зависимостям (5) и (8), а также требуемого числа автономных испытаний подсистем по соотношениям (10) и (11) при вариациях параметров  $P_{\text{mp}}$ ,  $\sigma_{\text{mp}}$ ,  $J$  и  $m_j$  приведены в табл. 1. Из табл. 1 следует, что для обеспечения срав-

нительно невысоких требований к ВБР ТС  $P_{\text{mp}} = 0,95$  при числе подсистем  $J = 10$  необходимо предъявить высокие требования к ВБР подсистем  $P_{j\text{mp}} = 0,995$ . Для подтверждения такой ВБР необходимо провести большой объем автономных испытаний каждой подсистемы (до 190 – 390) даже при ограниченном числе возможных случайных отказов подсистемы, что обычно практически неосуществимо при имеющихся экономических и временных ограничениях на отработку ТС.

Объем требуемых автономных испытаний подсистем можно значительно снизить, если перейти к заданию требований в форме гарантированной ВБР ТС, что рассматривается далее.

#### 4. Взаимосвязь требований к ожидаемой и гарантированной ВБР ТС

Требования к ожидаемому уровню ВБР ТС по первой форме можно связать с требованиями к гарантированному уровню ВБР по второй форме (п.1). Для анализа такой взаимосвязи предположим, что ожидаемая ВБР ТС соответствует требуемой  $P \neq P_{\text{mp}}$ . Допустим, что на основе результатов испытаний каким-либо методом получена несмещенная оценка ВБР ТС  $\bar{P}$  такая, что  $M[\bar{P}] = P$ , а ее СКО соответствует требуемой:  $\sigma_{\bar{P}} = \sigma_{\text{mp}}$ . В этом случае оценка ВБР имеет математическое ожидание, равное  $P_{\text{mp}}$ , и СКО, равное  $\sigma_{\text{mp}}$ . Возможная плотность распределения оценки показана на рис. 2.

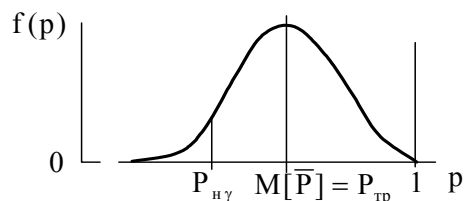


Рис. 2. Плотность распределения оценки ВБР ТС

Если задать доверительную вероятность  $\gamma$ , то на основе значений  $P_{\text{mp}}$  и  $\sigma_{\text{mp}}$  можно определить нижнюю

Таблица 1  
Требуемые объемы автономных испытаний подсистем при заданных требованиях  $P_{\text{mp}}$  и  $\sigma_{\text{mp}}$  к ВБР ТС

$m_j$	Параметры	$P_{\text{mp}} = 0,95$				$P_{\text{mp}} = 0,97$			
		$\sigma_{\text{mp}} = 0,05$		$\sigma_{\text{mp}} = 0,06$		$\sigma_{\text{mp}} = 0,05$		$\sigma_{\text{mp}} = 0,06$	
		$J = 5$	$J = 10$	$J = 5$	$J = 10$	$J = 5$	$J = 10$	$J = 5$	$J = 10$
	$P_{j\text{mp}}$	0,9898	0,9949	0,9898	0,9949	0,9939	0,9970	0,9939	0,9970
	$\sigma_{j\text{mp}}$	0,0233	0,0166	0,0280	0,0199	0,0229	0,0162	0,0275	0,0195
0	$n_{j1\text{mp}}$	96	191	96	191	163	325	164	327
	$n_{j2\text{mp}}$	40	57	33	47	41	58	34	48
1	$n_{j1\text{mp}}$	193	390	193	390	330	660	330	660
	$n_{j2\text{mp}}$	57	82	47	68	58	84	48	69

доверительную границу для ВБР по известной зависимости (рис. 2)

$$P_{н\gamma} = P_{mp} - u_{\gamma} \cdot \sigma_{mp} \quad (13)$$

где  $u_{\gamma}$  – квантиль закона распределения оценки ВБР, соответствующая доверительной вероятности  $\gamma$ .

При задании требований к ожидаемому уровню ВБР не оговаривается закон распределения оценок ВБР для подтверждения требуемой ВБР. Поэтому можно принять, что оценка ВБР  $\bar{P}$  имеет нормальное распределение, при котором квантиль  $u_{\gamma}$  вычисляется по функции Лапласа. Если задать требуемую доверительную вероятность  $\gamma_{mp}$ , то по зависимости (13) можно определить требуемое гарантированное значение ВБР при  $\gamma = \gamma_{mp}$

$$P_{нmp} \neq P_{mp} - u_{\gamma mp} \cdot \sigma_{mp} \quad (14)$$

Рассмотрим следующий пример. Задано требование к ожидаемой ВБР ТС в виде  $P_{mp} = 0,95$ ,  $\sigma_{mp} = 0,05$ . Необходимо определить соответствующее требование к гарантированной ВБР ТС при доверительной вероятности  $\gamma_{mp} = 0,9$ . По табличной функции Лапласа при  $\gamma = 0,9$  находим квантиль  $u_{\gamma} = 1,281$ . По зависимости (14) вычислим требуемое значение гарантированной ВБР

$$P_{нmp} = 0,95 - 1,281 \cdot 0,05 = 0,886. \quad (15)$$

Таким образом, требование к ожидаемой ВБР в виде  $P_{mp} = 0,95$ ,  $\sigma_{mp} = 0,05$  эквивалентно требованию к гарантированной ВБР в виде  $P_{нmp} = 0,886$ ,  $\gamma_{mp} = 0,9$ . При этом следует учитывать, что при задании требований к ожидаемой ВБР может быть до 50% неверных решений по правилу (1). Это можно показать следующим образом. Примем доверительную вероятность  $\gamma_{mp} = 0,5$ . При этом  $u_{\gamma mp} = 0$  и  $P_{нmp} = P_{mp}$ . В этом случае решение по правилу (3) эквивалентно решению по правилу (1), то есть достоверность правильного решения равна 50%. При задании же требований к гарантированной ВБР процент возможных неверных положительных решений по правилу (3) снижается до  $(1 - \gamma_{mp})\%$ . При  $\gamma_{mp} = 0,9$  доля возможных неверных решений составляет 10%.

**5. Оценивание нижней доверительной границы для ВБР подсистем по результатам испытаний**

Для контроля гарантированного уровня ВБР подсистем по правилу (3) необходимо определить оценку нижней доверительной границы для ВБР подсистем. Наиболее достоверно такая оценка вычисляется по результатам автономных испытаний подсистем. Для интервального оценивания ВБР необходимо определить закон распределения оценок ВБР. Рассмотрим построение такого закона на основе результатов испытаний. Если проведено  $n_j$  испытаний  $j$  – й подсистемы, при которых зафиксировано

$m_j$  случайных отказов (причины которых не установлены и доработки для устранения их не проведены), то, как показано в [4], распределение возможных оценок ВБР  $p_j$  подсистемы имеет бета-распределение с плотностью  $f(p_j) = (n_j + 1) C_{n_j}^{m_j} p_j^{n_j - m_j} (1 - p_j)^{m_j}$ ;  $j \neq 1, \dots, J$ , (16) где  $C_{n_j}^{m_j}$  – число сочетаний из  $n_j$  по  $m_j$ .

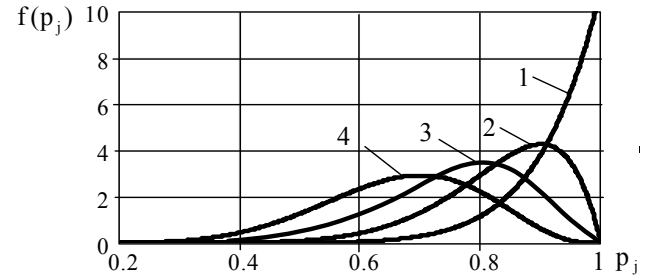


Рис. 3. Плотности распределения  $f(p_j)$  1–при  $m_j = 0$ ; 2–при  $m_j = 1$ ; 3–при  $m_j = 2$ ; 4–при  $m_j = 3$

Плотность распределения оценок зависит только от числа испытаний и числа случайных отказов. При  $n_j = 10$  и некоторых значениях  $m_j$  плотности показаны на рис. 3. Видно, что плотности имеют несимметричный вид, особенно при  $m_j = 0$ .

На основе плотностей (16) при заданной доверительной вероятности  $\gamma$  определяется нижняя доверительная граница  $\bar{P}_{jn}$  для ВБР подсистемы из соотношения:

$$\int_{\bar{P}_{jn}}^{\bar{P}_{jn}} f(p_j) dp_j = (n_j + 1) C_{n_j}^{m_j} \times \int_{\bar{P}_{jn}}^{\bar{P}_{jn}} p_j^{n_j - m_j} (1 - p_j)^{m_j} dp_j = 1 - \gamma, \quad j \neq 1, \dots, J, \quad (17)$$

В соответствии с общей зависимостью (17) получаются следующие соотношения для нахождения оценок нижней доверительной границы для ВБР подсистем при ограниченных значениях числа отказов  $m$

при  $m_j = 0$ :  $\bar{P}_{jn} = \sqrt[n_j + 1]{1 - \gamma}$ ; (18)

при  $m_j = 1$ :  $(n_j + 1) \bar{P}_{jn}^{n_j} \left( 1 - \frac{n_j}{n_j + 1} \bar{P}_{jn} \right) = 1 - \gamma$ ; (19)

при  $m_j = 2$ :  $0,5 n_j (n_j + 1) \bar{P}_{jn}^{n_j - 1} \times \left[ 1 - \frac{2(n_j - 1)}{n_j} \bar{P}_{jn} + \frac{n_j - 1}{n_j + 1} \bar{P}_{jn}^2 \right] = 1 - \gamma$ . (20)

Оценки из соотношений (19), (20) определяются численными методами. Плотности (16) и зависимости (18) – (20) позволяют определить требования в гарантированной ВБР подсистем на основе заданной требуемой ВБР ТС.

**6. Методика определения требований к гарантированной ВБР подсистем**

Рассмотрим ТС, для которой задано требование к гарантированному уровню ВБР  $P_{n\ mp}$  и  $\gamma_{mp}$ . Поставим задачу определить соответствующие требования к гарантированной ВБР подсистем  $P_{j\ n\ mp}$  и  $\gamma_{j\ mp}$ ,  $j \neq 1, \dots, J$  при предположении, что контроль ВБР подсистем будет осуществляться по результатам автономных испытаний. Такая задача является некорректной и не может быть решена без дополнительных упрощающих допущений. Для решения задачи предположим, что требуемые значения ВБР и доверительные вероятности для всех подсистем одинаковы

$$\gamma_{j\ mp} = \text{const} = \gamma_{mp}; P_{j\ n\ mp} = \text{const}, \quad j \neq 1, \dots, J. \quad (21)$$

При допущениях (21) для определения требований к гарантированной ВБР подсистем можно использовать численные методы с использованием статистического моделирования. Для этого можно реализовать следующий алгоритм последовательных приближений.

1. Задается требование к гарантированной ВБР ТС  $P_{n\ mp}$ ,  $\gamma_{mp}$  и число подсистем  $J$ , влияющих на ВБР ТС.

2. Выбирается некоторое начальное число автономных испытаний  $n_j$  и допустимое число случайных отказов  $m_j$ , одинаковое для всех подсистем.

3. С учетом плотности распределения оценок ВБР (16) по датчику псевдослучайных чисел бета – распределения (БР) моделируются независимо друг от друга  $\nu$ -е реализации оценок ВБР подсистем

$$p_{j\nu} \in \text{БР}[n_j; m_j], \quad j \neq 1, \dots, J, \quad \nu = 1, \dots, N. \quad (22)$$

4. Вычисляется  $\nu$ -я реализация оценки ВБР ТС с учетом (6) по зависимости:

$$p_\nu = \prod_{j=1}^J p_{j\nu}, \quad \nu = 1, \dots, N. \quad (23)$$

5. Повторяются вычисления по пп. 3 и 4  $N$  раз и строится гистограмма распределения оценок ВБР ТС при выбранных значениях  $n_j$  и  $m_j$ .

6. По гистограмме строится плотность  $f(p)$  или функция  $F(p)$  распределения оценок ВБР ТС с использованием методов интерполяции и экстраполяции. Для получения хорошей точности необходимо провести значительное число серий статистического моделирования  $N > 1000$ .

7. На основе построенной плотности  $f(p)$  или функции  $F(p)$  распределения оценок ВБР ТС при заданной доверительной вероятности  $\gamma_{mp}$  вычисляется оценка нижней доверительной границы для ВБР ТС по одной из зависимостей:

$$\int_0^{\bar{P}_n} f(p) dp = 1 - \gamma_{mp} \quad \text{или} \quad F(\bar{P}_n) = 1 - \gamma_{mp}. \quad (24)$$

8. Полученная оценка  $\bar{P}_n$  сравнивается с требуемым значением  $P_{n\ mp}$ . Если они не совпадают, то изменяется число испытаний  $n_j$  в ту или другую сторону и повторяются вычисления по пп. 3 – 8, пока методом последовательных приближений не будет достигнуто равенство

$$\bar{P}_n = P_{n\ mp}. \quad (25)$$

9. Число испытаний  $n_j$  при котором достигается равенство (25), соответствует требуемому объему автономных испытаний подсистем  $n_{j\ mp}$  при принятом допустимом числе случайных отказов  $m_j$ . На основе полученных таким образом значений  $n_{j\ mp}$  и  $m_j$  по зависимостям (17) – (20) определяется требуемый гарантированный уровень ВБР подсистем  $P_{j\ n\ mp}$ .

Гарантированная ВБР  $P_{j\ n\ mp}$ , вычисленная по п. 9, отражает средний уровень требований к ВБР подсистем. Если в составе ТС имеются отдельные подсистемы, для которых по технико-экономическим показателям могут быть заданы другие требования к показателям  $P_{j\ n\ mp}$ , то для таких подсистем определяются требуемые объемы автономных испытаний  $n_{j\ mp}$  на основе зависимостей (17) – (20) при соответствующем допустимом числе случайных отказов. Для этих подсистем значения  $n_{j\ mp}$  при вычислениях фиксируются, а вариации числа испытаний по п. 2 производятся только для остальных подсистем.

Рассмотрим пример. К технической системе, содержащей 10 подсистем, предъявлено требование к гарантированной ВБР  $P_{n\ mp} = 0,90$  при доверительной вероятности  $\gamma_{mp} = 0,90$ . Необходимо определить требования к гарантированной ВБР подсистем  $P_{j\ n\ mp}$  при  $\gamma_{j\ mp} = \gamma_{mp}$  и допустимом числе случайных отказов  $m_j \leq 1$ .

Для решения задачи были проведены вычисления по изложенному выше алгоритму в системе MathCAD, при этом число серий статистического моделирования принято равным  $N = 10000$ . Методом последовательных сближений при  $m_j = 0$  и  $m_j = 1$  было определено требуемое число автономных испытаний подсистем  $n_{j\ mp} = 142$  и  $n_{j\ mp} = 253$  соответственно. Плотности распределения оценок ВБР подсистем при полученном числе автономных испытаний по зависимости (16) показаны на рис. 4. Плотности и функции распределения оценок ВБР ТС в дискретных точках, вычисляемые в результате статистического моделирования по реализациям оценок ВБР подсистем, показаны на рис. 5 и 6.

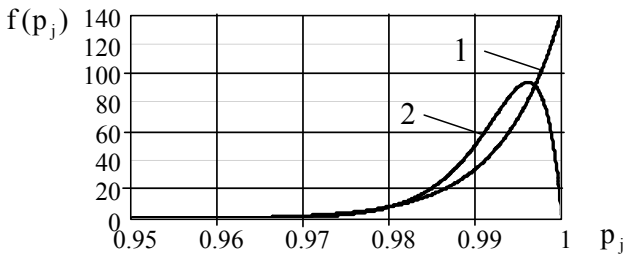


Рис. 4. Плотности распределения оценок ВБР подсистем: 1 – при  $m_j = 0$ ; 2 – при  $m_j = 1$

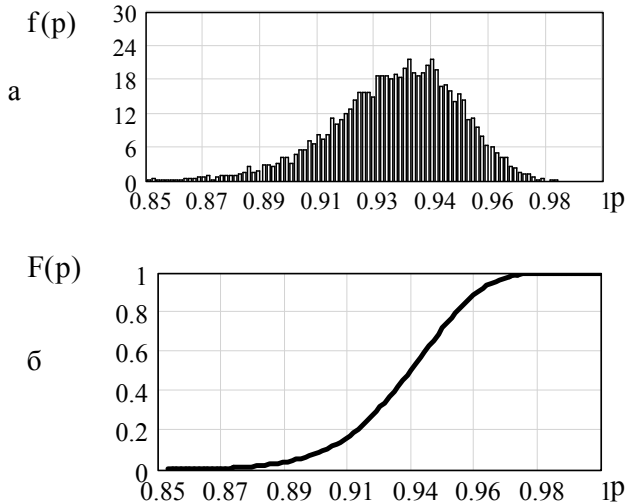


Рис. 5. Плотность (а) и функция распределения (б) оценок ВБР ТС при  $m_j = 0$

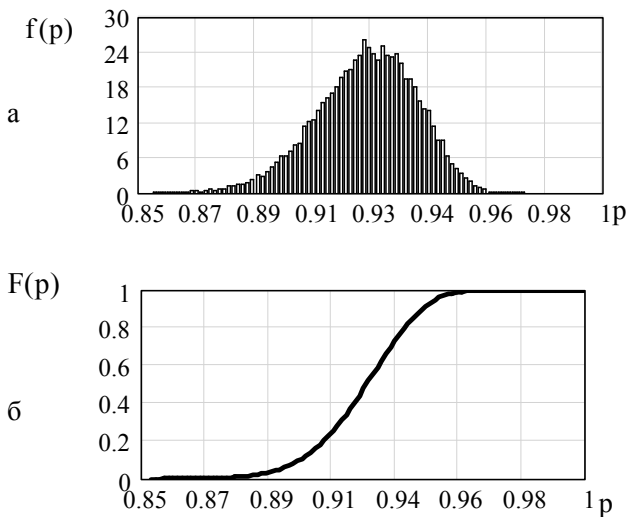


Рис. 6. Плотность (а) и функция распределения (б) оценок ВБР ТС при  $m_j = 1$

Из рисунков видно, что вид закона распределения оценок ВБР ТС слабо зависит от распределения оценок ВБР подсистем, показанных на рис. 4, и примерно соответствует нормальному распределению. При полученных требуемых объемах автономных испытаний подсистем и предполагаемом числе случайных отказов  $m_j$  по зависимостям (17) – (20) или на основе интегрирования плотностей распределения оценок ВБР подсистем, показан-

ных на рис. 4, определяется требуемый гарантированный уровень ВБР подсистем

$$\left. \begin{aligned} \text{при } n_{j_{mp}} = 142, m_j = 0: P_{j_{n_{mp}}} = 0,9840; \\ \text{при } n_{j_{mp}} = 253, m_j = 1: P_{j_{n_{mp}}} = 0,9849. \end{aligned} \right\} \quad (26)$$

Полученные данные (26) показывают, что требуемый гарантированный уровень ВБР подсистем практически не зависит от вида распределения оценок ВБР подсистем (рис. 4) и предполагаемого числа допустимых случайных отказов подсистем при автономных испытаниях, хотя требуемое число испытаний подсистем даже при одном случайном отказе почти в два раза превышает число испытаний при безотказных испытаниях.

### 7. Сравнение эффективности форм задания требований к ВБР ТС и их подсистем

Для сравнения эффективности разных форм задания требований к ВБР ТС и их подсистем была проведена серия вычислений по методике п. 6 при вариациях параметров и требований к ожидаемой ВБР, соответствующих табл. 1. При этом для каждого варианта требований к ожидаемой ВБР были определены соответствующие эквивалентные требования к гарантированной ВБР ТС по зависимости (14) при доверительных вероятностях  $\gamma \in [0,8; 0,9]$ . Соответствующие требования к гарантированной ВБР подсистем и необходимые объемы автономных испытаний подсистем определялись по алгоритму п.6. Результаты вычислений в системе MathCAD представлены в табл. 2.

Из табл. 2 следует, что требуемые гарантированные значения ВБР подсистем возрастают при увеличении числа подсистем  $J$  и при снижении требуемой доверительной вероятности  $\gamma_{mp}$ . Требуемый объем автономных испытаний возрастает с увеличением числа подсистем, несколько снижается с увеличением требуемой доверительной вероятности и сильно увеличивается при допущении хотя бы одного случайного отказа. Из табл. 2 также видно, что допустимое число случайных отказов  $m_j$  при автономных испытаниях практически не влияет на требуемые значения гарантированных ВБР подсистем.

Сравнение данных табл. 1 и 2 показывает, что при гарантированной форме задания требований к ВБР требуемые объемы автономных испытаний подсистем значительно снижаются. Результаты сравнения приведены в табл. 3, составленной по данным табл. 1 и 2. В последних строках табл. 3 приведено отношение R требуемого числа автономных испытаний подсистем для подтверждения требований к ожидаемой ВБР к среднему числу АИ подсистем для подтверждения требований к гарантированной ВБР.

Из табл. 3 следует, что при использовании вто-

Таблица 2

Требуемые гарантированные значения ВБР и объемы автономных испытаний подсистем при вариациях параметров  $P_{mp}$ ,  $\sigma_{mp}$ ,  $J$ ,  $\gamma_{mp}$  и  $m_j$

$\gamma_{mp}$	$m_j$	Параметры	$P_{mp} = 0,95$				$P_{mp} = 0,97$			
			$\sigma_{mp} = 0,05$		$\sigma_{mp} = 0,06$		$\sigma_{mp} = 0,05$		$\sigma_{mp} = 0,06$	
			$J = 5$	$J = 10$	$J = 5$	$J = 10$	$J = 5$	$J = 10$	$J = 5$	$J = 10$
0,8	0	$P_{n,mp}$	0,908	0,908	0,899	0,899	0,928	0,928	0,919	0,919
		$P_{j,н,mp}$	0,978	0,988	0,976	0,987	0,983	0,991	0,981	0,990
	1	$n_{i,mp}$	70	130	64	120	93	174	83	155
		$P_{j,н,mp}$	0,977	0,988	0,976	0,987	0,983	0,991	0,981	0,990
0,9	0	$P_{n,mp}$	0,886	0,886	0,873	0,873	0,906	0,906	0,893	0,893
		$P_{j,н,mp}$	0,967	0,981	0,962	0,979	0,973	0,985	0,969	0,982
	1	$n_{i,mp}$	67	120	59	110	84	147	73	129
		$P_{j,н,mp}$	0,968	0,982	0,964	0,981	0,974	0,986	0,971	0,984
		$n_{i,mp}$	119	217	106	200	147	269	129	236

Таблица 3

Требуемые объемы автономных испытаний подсистем при разных формах требований к ВБР

Форма требований		$m_j$	$P_{mp} = 0,95$				$P_{mp} = 0,97$			
			$\sigma_{mp} = 0,05$		$\sigma_{mp} = 0,06$		$\sigma_{mp} = 0,05$		$\sigma_{mp} = 0,06$	
			$J = 5$	$J = 10$	$J = 5$	$J = 10$	$J = 5$	$J = 10$	$J = 5$	$J = 10$
к ожидаемой ВБР		0	96	191	96	191	163	325	164	327
		1	193	390	193	390	330	660	330	660
к гарантированной ВБР	$\gamma_{mp} = 0,8$	0	70	130	64	120	93	174	83	155
		1	130	245	121	225	174	327	155	293
	$\gamma_{mp} = 0,9$	0	67	120	59	110	84	147	73	129
		1	119	217	106	200	147	269	129	236
$R = \frac{n_{j,mp,ож}}{n_{j,mp,гар}}$		0	1,40	1,53	1,56	1,66	1,83	2,02	2,10	2,30
		1	1,54	1,69	1,70	1,84	2,06	2,21	2,32	2,50

рой формы требований к ВБР ТС и подсистем объемы автономных испытаний подсистем или объемы другой информации, необходимой для подтверждения ВБР ТС, сокращаются в 1,4 – 2,5 раза по сравнению с первой формой требований к ВБР. При этом одновременно обеспечивается необходимая достоверность решения о соответствии ВБР ТС заданным требованиям. Это подтверждает целесообразность задания требований к гарантированной ВБР ТС и подсистем.

Данные табл. 3 показывают, что для подтверждения требований к ВБР подсистем необходимо провести большой объем автономных испытаний, что практически невозможно обеспечить при существующих ограниченных возможностях. Затраты на отработку ТС можно снизить на основе перераспределения объемов автономных и комплексных испытаний. Как показано в работе [5], для достижения приемлемого компромисса между противоречивыми показателями качества отработки ТС, прежде всего между затратами на отработку и достигаемой ВБР ТС, целесообразно переходить к комплексным испытаниям

ТС на более раннем этапе, когда оценка ВБР ТС, определенная на основе оценок ВБР подсистем по структурной схеме надежности, достигает до 50 % от требуемого значения ВБР ТС. Сокращение объемов испытаний и числа испытываемых элементов ТС можно обеспечить также на основе проведения поэтапных групповых испытаний подсистем в виде функциональных сборок, в состав которых входят по 2 – 5 подсистем [5]. Благодаря этому для подтверждения требуемой ВБР ТС затраты на отработку ТС и их подсистем можно сократить в несколько раз.

### 8. Оперативное вычисление требуемой гарантированной ВБР подсистем при заданной гарантированной ВБР ТС

Методика определения требований к гарантированной ВБР подсистем, изложенная в п. 6, является довольно трудоемкой. Для повышения оперативности пересчета требований к гарантированной ВБР ТС в аналогичные требования к ВБР подсистем был проведен цикл вычислений по методике п. 6 при вариациях раз-

Таблица 4

Требуемые гарантированные ВБР  $P_{j, n, mp}$  подсистем при некоторых значениях параметров  $P_{n, mp}$ ,  $J$  и  $\gamma_{mp}$

$J$	3			5			7		
	$\gamma_{mp}$	0,7	0,8	0,9	0,7	0,8	0,9	0,7	0,8
$P_{n, mp}=0,80$	0,929	0,923	0,911	0,955	0,950	0,940	0,968	0,963	0,955
$P_{n, mp}=0,85$	0,948	0,944	0,936	0,967	0,963	0,956	0,976	0,972	0,967
$P_{n, mp}=0,90$	0,966	0,963	0,958	0,979	0,976	0,972	0,984	0,982	0,978
$P_{n, mp}=0,95$	0,985	0,983	0,980	0,991	0,989	0,986	0,993	0,992	0,990

$J$	10			12			15		
	$\gamma_{mp}$	0,7	0,8	0,9	0,7	0,8	0,9	0,7	0,8
$P_{n, mp}=0,80$	0,977	0,972	0,965	0,981	0,977	0,971	0,985	0,981	0,976
$P_{n, mp}=0,85$	0,983	0,980	0,975	0,986	0,983	0,979	0,989	0,986	0,983
$P_{n, mp}=0,90$	0,989	0,987	0,984	0,991	0,989	0,986	0,993	0,991	0,989
$P_{n, mp}=0,95$	0,995	0,994	0,993	0,996	0,995	0,993	0,997	0,996	0,995

личных параметров. Результаты определения требуемой гарантированной ВБР  $P_{j, n, mp}$  подсистем в зависимости от гарантированной ВБР ТС  $P_{n, mp}$ , числа подсистем  $J$  и уровня доверительной вероятности  $\gamma_{mp}$  приведены в табл. 4. Зависимости  $P_{j, n, mp}$  от некоторых параметров показаны на рис. 7–9. При этом учитывалось, что значения  $P_{j, n, mp}$  практически не зависят от предполагаемого числа случайных отказов подсистем при АИ (табл. 2).

На основе приведенных данных можно оперативно определить средний уровень требуемой гарантированной ВБР подсистем при заданном требовании к гарантированной ВБР ТС. Для этого можно использовать различные графические и аналитические методы интерполяции и экстраполяции. Полученные при этом значения  $P_{j, n, mp}$  можно уточнить на основе методики п. 6.

Рассмотрим следующий пример. Техническая система состоит из  $J = 9$  подсистем. К ТС предъявлены следующие требования к гарантированной ВБР:  $P_{n, mp} = 0,85$ ,  $\gamma_{mp} = 0,8$ . Необходимо определить соответствующие требования к гарантированной ВБР подсистем.

На основе данных табл. 4 при  $P_{n, mp} = 0,85$ ,  $\gamma_{mp} = 0,8$  находим: при  $J = 7$  значение  $P_{j, n, mp} = 0,972$ ; при  $J = 10$   $P_{j, n, mp} = 0,980$ . Линейной интерполяцией вычисляем требуемую гарантированную ВБР подсистем при  $J = 9$ :  $P_{j, n, mp} = 0,977$ . Значение гарантированной ВБР подсистем, полученное в результате статистического моделирования по методике п. 6, составляет:  $P_{j, n, mp} = 0,978$ . Точность определения требуемой гарантированной ВБР подсистем, полученное оперативным методом, можно признать удовлетворительным. Следует иметь в виду, что по изложенному методу определяется осредненное значение требуемой ВБР подсистем, которое затем может корректироваться для каждой подсистемы с учетом технико-экономических возможностей.

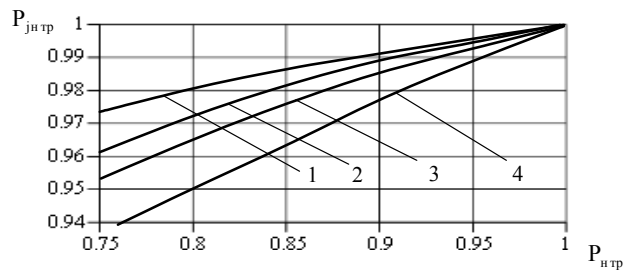


Рис. 7. Зависимости  $P_{j, n, mp}$  от  $P_{n, mp}$ :  
1– при  $J = 15, \gamma_{mp} = 0,8$ ; 2– при  $J = 10, \gamma_{mp} = 0,8$ ;  
3– при  $J = 10, \gamma_{mp} = 0,9$ ; 4– при  $J = 5, \gamma_{mp} = 0,8$

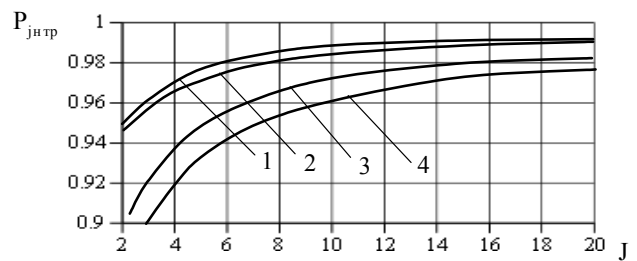


Рис. 8. Зависимости  $P_{j, n, mp}$  от  $J$ :  
1– при  $P_{n, mp} = 0,9, \gamma_{mp} = 0,8$ ; 2– при  $P_{n, mp} = 0,9, \gamma_{mp} = 0,9$ ;  
3– при  $P_{n, mp} = 0,8, \gamma_{mp} = 0,8$ ; 4– при  $P_{n, mp} = 0,8, \gamma_{mp} = 0,95$

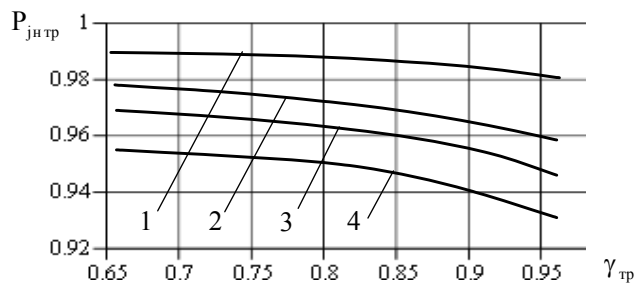


Рис. 9. Зависимости  $P_{j, n, mp}$  от  $\gamma_{mp}$ :  
1– при  $P_{n, mp} = 0,9, J = 10$ ; 2– при  $P_{n, mp} = 0,8, J = 10$ ;  
3– при  $P_{n, mp} = 0,8, J = 7$ ; 4– при  $P_{n, mp} = 0,8, J = 5$



## 9. Выводы и рекомендации

1. Требования к ВБР ТС и их подсистем могут задаваться в виде двух форм (п.1): требований к ожидаемой или гарантированной ВБР. В результате проведенных исследований показано, что более эффективной является форма требований к гарантированной ВБР, для подтверждения которой необходимо значительно меньше испытаний и при этом обеспечивается более высокая достоверность решения о соответствии ВБР требуемой (п. 7).

2. Разработана методика определения требований к осредненной гарантированной ВБР подсистем при заданных требованиях к гарантированной ВБР ТС и доверительной вероятности для ее подтверждения. Методика основана на использовании методов статистического моделирования и последовательных приближений (п.6).

3. Показано, что требуемые гарантированные ВБР подсистем зависят от числа подсистем, требуемой гарантированной ВБР ТС и доверительной вероятности для ее подтверждения. Эти зависимости представлены в виде табличных и графических данных (п.8). На основе полученных зависимостей предложена методика оперативного определения требуемой осредненной гарантированной ВБР подсистем (п.8).

4. Получаемые по разработанным методикам требования к осредненному уровню гарантированной

ВБР подсистем могут корректироваться на основе анализа технико-экономических и временных затрат для достижения и подтверждения требуемых гарантированных ВБР подсистем с учетом особенностей каждой подсистемы.

5. Проведенные исследования показали, что к подсистемам современных ТС предъявляются высокие требования к ВБР, для подтверждения которых необходим большой объем автономных испытаний или другой информации о надежности подсистем, что практически невозможно обеспечить при существующих ограниченных возможностях. Для снижения технико-экономических и временных затрат на отработку ТС целесообразно переходить к комплексным испытаниям ТС на более раннем этапе, когда оценка ВБР ТС, определенная на основе оценок ВБР подсистем по структурной схеме надежности, достигает примерно 50 % от требуемого значения ВБР ТС [5]. Дальнейшее сокращение объемов испытаний и числа испытываемых элементов ТС, как показано в работе [5], возможно на основе проведения поэтапных групповых испытаний подсистем в виде функциональных сборок, в состав которых включаются по 2–5 подсистем (элементов). В результате этого затраты на отработку ТС и их подсистем для подтверждения требуемой ВБР ТС можно сократить в несколько раз.

### Литература

1. ГОСТ 21697-87. Комплексы наземные. Основные положения по обеспечению и контролю надежности.
2. ГОСТ 21259-89. Системы и комплексы космические. Порядок задания требований, оценки и контроля надежности.
3. Сухорученков Б. И. Анализ эффективности методов контроля надежности военно-технических систем // *Двойные технологии*. – М., 2003. - № 1(22). С. 40 – 43.
4. Сухорученков Б. И. Методы оценивания показателей безотказности по ограниченной выборке // *Сборник трудов. СИП РИА*, 2006. Вып. 14. С. 101-123.
5. Сухорученков Б. И. Методы планирования объемов отработочных испытаний военно-технических систем на надежность // *Двойные технологии*. – М., 2006. - № 1(34). С. 32 – 39.

Материал поступил в редакцию 03. 03. 2008г.