

УДК 62-192: 519.248 + 629.7.017.1

© Сухорученков Б.И., Огороков М.В.  
Sukhoruchenkov B., Okorokov M.

## ОЦЕНКИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ВОЗМОЖНЫХ ДЕФЕКТОВ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ, НЕ ВЫЯВЛЕННЫХ ПОСЛЕ ОТРАБОТОЧНЫХ ИСПЫТАНИЙ

### PERFORMANCE EVALUATION OF POSSIBLE DEFECTS TECHNICAL SYSTEMS THAT HAVE NOT BEEN IDENTIFIED AFTER A DEVELOPMENTAL TESTS

**Аннотация.** В работах [1, 2] выдвинута концепция, согласно которой безотказность технических систем (ТС) и их элементов ограничена из-за наличия возможных дефектов, имеющих случайный характер проявления. После отработочных испытаний ТС на безотказность могут остаться невыявленные дефекты и снизить безотказность ТС при эксплуатации. В статье излагаются способы статистического оценивания возможного числа и показателей таких дефектов, а также показателей безотказности ТС с учетом оставшихся дефектов.

**Annotation.** In works [1, 2] proposed a concept according to which the reliability of technical systems (TS) and their elements is limited due to the presence of potential defects that random character of manifestation. After the developmental testing TS for trouble may remain undetected defects and reduce the reliability of the TS operation. The article considers the methods of statistical estimation of the possible number and performance of such defects, as well as indicators of reliability of the vehicle with regard to the remaining defects.

**Ключевые слова.** Техническая система, дефект, безотказность, испытание, число невыявленных дефектов.

**Key words.** Technical system, defect, reliability, testing, the number of undetected defects.

#### Введение

В соответствии с концепцией безотказности технических систем (ТС), изложенной в работах [1, 2], безотказность ТС ограничена из-за возможных дефектов ТС и их элементов. При отработочных испытаниях ТС показатели безотказности улучшаются благодаря выявлению возможных дефектов и устранению их на основе доработок. Однако при ограниченном объеме испытаний некоторые дефекты могут остаться невыявленными и снизить достигнутый уровень безотказности ТС. Поэтому для достоверного контроля показателей безотказности ТС необходимо иметь информацию о возможных дефектах, оставшихся после проведенных испытаний. Результаты исследований показателей и возможного числа таких дефектов излагаются далее.

#### 1. Оценивание показателей возможных дефектов ТС одноразового применения по результатам испытаний 1.1. Влияние дефектов на вероятность безотказной работы ТС

Рассматривается ТС или ее основные элементы одноразового применения без резервирования. В работе [1] показано, что в начале жизненного цикла ТС может иметь  $Q$  дефектов, показатели которых характеризуются вероятностями не проявления дефектов (ВНД)  $G_q$ ,  $q=1, \dots, Q$ . Для повышения показателей безотказности ТС проводится цикл мероприятий (отработочных и контрольных испытаний, опытной эксплуатации и др.), в течение которых осуществляется выявление и устранение различных возможных дефектов. Рассмотрим серию  $i$ -х отработочных испытаний ТС,  $i=1, \dots, n$ . При каждом испытании мо-

---

Сухорученков Борис Иванович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры баллистических ракет, Военная академия РВСН имени Петра Великого, тел. (495) 696-06-48;

Огороков Максим Владимирович – адъюнкт, кафедра баллистических ракет, Военная академия РВСН имени Петра Великого.

Sukhoruchenkov Boris – doctor of engineering sciences, professor, professor of department of ballistic rockets, Military academy of RVSN of the name of Peter Great, tel. (495) 696-06-48;

Okorokov Maxim – adjunct, department of ballistic rockets, Military academy of RVSN of the name of Peter Great.

жет быть выявлен  $q$ -й дефект. Будем полагать, что доработки для устранения дефектов являются эффективными, так что после этого ВНД  $G_q$  становятся равными единице. Если выявлены и устранены все возможные дефекты, то ТС имеет предельный уровень вероятности безотказной работы (ВБР) в течение периода целевого использования, равный  $P_k$ . С учетом концепции [1] ВБР ТС в процессе отработочных испытаний изменяется в соответствии с моделью

$$P_i = P_k \prod_{q=1}^Q G_q(i), \quad i = 1, \dots, n. \quad (1)$$

Если  $q$ -й дефект выявлен при испытании с номером  $i = i_q$ , то функция  $G_q(i)$  имеет ступенчатый характер при  $i \leq i_q; G_q(i) = G_q < 1;$  }  
 при  $i > i_q; G_q(i) = 1.$  } (2)

Из (1) видно, что возможные дефекты могут существенно снизить ВБР ТС. Особенно опасны невыявленные (скрытые) дефекты, которые могут остаться после окончания испытаний (при  $i=n$ ) и принятия ТС в эксплуатацию. В этом случае ВБР ТС определяется по зависимости

$$P_n = P_k \prod_{q=Q_B+1}^Q G_q, \quad (3)$$

где  $Q_B$  – число дефектов, выявленных и устраненных при испытаниях ( $Q_B \leq Q$ ).

**1.2. Оценка вероятностей не проявления дефектов ТС**

Как следует из (1), на ВБР ТС влияет уровень вероятностей не проявления дефектов (ВНД)  $G_q$ . Показатели  $G_q$  неизвестны, однако их можно оценить по результатам отработочных испытаний по методу несмещенных оценок (МНО) [3, 4]. Если  $q$ -й дефект выявлен при  $i_q$ -м испытании, то несмещенная оценка ВНД и ее дисперсия в соответствии с МНО определяются по зависимостям

$$\bar{G}_q = \frac{i_q}{i_q + 2}; \quad \sigma_{\bar{G}_q}^2 = \frac{2i_q}{(i_q + 2)^2(i_q + 3)}, \quad q=1, \dots, Q_B. \quad (4)$$

При ограниченном числе испытаний  $n$  могут остаться невыявленные дефекты ( $Q > Q_B$ ). Оценки вероятностей не проявления таких дефектов и их дисперсии также можно оценить по МНО [3, 4]

$$\bar{G}_q = \frac{n+1}{n+2}; \quad \sigma_{\bar{G}_q}^2 = \frac{n+1}{(n+2)^2(n+3)}, \quad q=Q_B+1, \dots, Q. \quad (5)$$

С повышением числа испытаний оценки ВНД невыявленных дефектов повышаются, а их дисперсии снижаются.

**1.3. Оценка вероятностей возможного числа невыявленных дефектов ТС по методу несмещенных оценок**

Определение числа невыявленных дефектов (НД) ТС представляет сложную задачу, близкую к некорректной, так как информация о таких дефектах при испытаниях отсутствует. Поэтому такую задачу можно решить только на вероятностном уровне. Теоретически число оставшихся дефектов, особенно с высокой ВНД, может быть от нуля и выше [1]. Однако при невысокой ВНД, измеримой с оценкой (5), вероятности возможного числа таких дефектов можно оценить по МНО [3, 4]. Предположим, что максимальное число НД равно  $R_{max}$ . Обозначим номера и число возможных НД в виде  $r=0, 1, \dots, R \leq R_{max}$ . В работе [3] показано, что с учетом (5) оценки вероятностей числа дефектов ТС, оставшихся после  $n$  испытаний, определяются по зависимости

$$B(R) = \left[ \sum_{r=0}^{R_{max}} \left( \frac{n+1}{n+2} \right)^{n \cdot R} \right]^{-1} \left( \frac{n+1}{n+2} \right)^{n \cdot R}, \quad r = 0; 1; \dots; R_{max}. \quad (6)$$

Оценки вероятностей числа НД зависят от числа испытаний ТС и максимально возможного числа дефектов. Вероятности (6) при  $n = 15$  и вариациях числа  $R_{max}$  показаны на рис. 1. Для наглядности здесь и далее значения в дискретных точках соединены прямыми линиями.

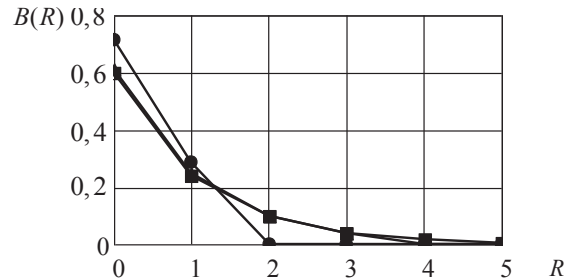


Рис. 1. Оценки вероятностей числа скрытых дефектов по МНО при  $n = 15$  и предполагаемом максимально возможном числе НД  $R_{max}$ :  
 ● ● ● –  $R_{max} = 1$ ; ■ ■ ■ –  $R_{max} = 5$

Вероятности (6) при  $R_{max} = 5$  при некоторых объемах испытаний ТС показаны на рис. 2.

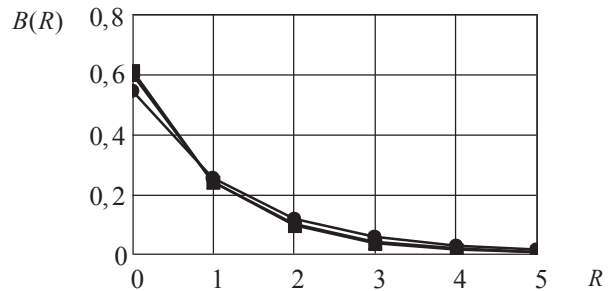


Рис. 2. Оценки вероятностей числа скрытых дефектов по МНО при  $R_{max} = 5$  и вариациях числа испытаний  $n$ :  
 ● ● ● –  $n = 5$ ; ■ ■ ■ –  $n = 25$

Из рис. 1 и 2 видно, что оценки вероятностей числа НД практически не зависят от числа испытаний ТС. При увеличении объема испытаний возрастают оценки ВНД по зависимости (5) и повышается их точность. При умеренном числе возможных дефектов практически с вероятностью  $B = 0,90$  после испытаний может остаться не более 2 возможных дефектов ТС или их основных элементов.

**1.4. Оценки вероятностей возможного числа невыявленных дефектов ТС по биномиальному распределению**

Оценки числа НД можно получить на основе биномиального распределения. Если в каждом испытании ТС для каждого  $r$ -го дефекта  $r=1, \dots, R$ , ВНД равна  $G_r$ , то вероятность не проявления дефекта после  $n$  испытаний равна

$$V_r = \prod_{i=1}^n G_r. \tag{7}$$

Предположим, что дефекты имеют одинаковые ВНД. В этом случае оценка вероятности (7) с учетом оценок (5) для всех  $r$ -х скрытых дефектов одинакова и равна

$$\bar{V}_r = \bar{G}_r^n = \left( \frac{n+1}{n+2} \right)^n. \tag{8}$$

Допустим, что ТС имела  $N$  скрытых дефектов с показателями (7). Предположим, что максимально возможное число НД равно  $R_{max}$ . При испытаниях может быть выявлено  $r$  дефектов, так что может остаться  $R \leq R_{max}$  невыявленных дефектов, то есть  $N=R+r$ . При известном значении  $R$  и известной вероятности (7) в соответствии с биномиальным распределением оценки априорных вероятностей числа  $r$  возможных выявленных при испытаниях дефектов определяются по зависимости

$$B(r) = C_{R+r}^r V_r^r (1-V_r)^{R+r-r}, \quad r = 0, \dots, R, \quad R = 0, \dots, R_{max}, \tag{9}$$

где  $C_{R+r}^r$  – число сочетаний из  $R+r$  по  $r$ .

Выдвигается гипотеза, что число НД равно  $R \in [0; R_{max}]$ . Если при испытаниях выявлено  $r$  дефектов, то апостериорная вероятность числа НД в соответствии с формулой Байеса с учетом (9) будет равна

$$B(R) = \left[ \sum_{R=0}^{R_{max}} B(r) \right]^{-1} B(r), \tag{10}$$

где  $B(r)$  – вероятность (9) при подстановке зафиксированного при испытаниях числа  $r$ . В рассматриваемом случае, когда ни один из возможных дефектов не был выявлен,  $r=0$ . С учетом этого и используя вместо неизвестной вероятности (7) ее оценку (8), после преобразований зависимости (10) для вероятностей числа НД получим

$$B(R) = \left[ \sum_{R=0}^{R_{max}} \left( \frac{n+1}{n+2} \right)^{n \cdot R} \right]^{-1} \left( \frac{n+1}{n+2} \right)^{n \cdot R}, \quad R = 0, \dots, R_{max}. \tag{11}$$

Полученная зависимость совпадает с формулой (6). Поэтому оценки числа НД по биномиальному распределению совпадают с оценками по МНО, приведенными в п. 1.3, вероятности которых показаны на рис. 1 и 2. На основе результатов, полученных в пп. 1.3 и 1.4 следует, что после испытаний ТС практически с вероятностью  $B \geq 0,90$  может остаться не более 2 скрытых дефектов, вероятности не проявления которых оцениваются по зависимостям (6). Наиболее вероятно, что после испытаний все дефекты с ВНД, соизмеримыми с ВБР ТС, будут выявлены.

**1.5. Оценки вероятностей возможного числа невыявленных дефектов ТС на основе статистического моделирования**

Приведенные выше результаты получены теоретически. Для оценки вероятностей возможного числа НД можно использовать метод статистического моделирования. Для этого допустим, что ТС имеет до испытаний  $N$  дефектов с ВНД в диапазоне  $G \in [G_{\min}; G_{\max}]$ . В процессе испытаний дефекты случайным образом выявляются и устраняются путем доработок. Проведем анализ вероятностей возможного числа оставшихся после испытаний дефектов путем моделирования процесса испытаний с использованием датчика псевдослучайных чисел (ДПСЧ) с равномерным распределением  $\xi_i \in DR[A; B]$ . Для этого в каждом  $i$ -м «испытании»,  $i=1, \dots, n$ , получается возможное значение ВНД  $G_q$ ,  $q=1, \dots, N$ , по ДПСЧ:  $G_q \in DR[A; B]$ . По такому же датчику определяется реализация случайного числа  $\xi_i \in DR[0; 1]$ . При  $\xi_i > G_q$  считается, что  $q$ -й дефект выявлен, иначе он остается до следующего испытания. Таким образом моделируется  $J$  серий «испытаний» и вычисляются частоты оставшихся дефектов как оценки вероятностей числа НД.

Статистическое моделирование было проведено при следующих параметрах:  $A=0,5, B=0,98, n=15, J=10000$ . Результаты моделирования при вариациях ограниченно-го числа начальных дефектов  $N$  представлены на рис. 3.

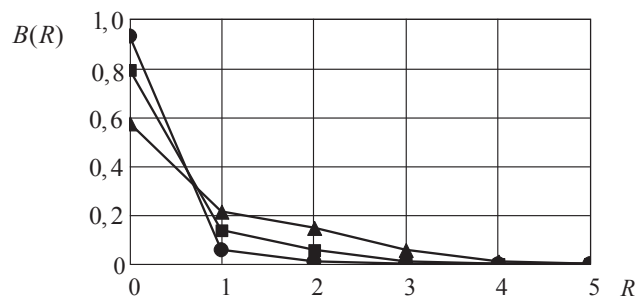


Рис. 3. Статистические вероятности числа невыявленных дефектов ТС из  $N$  возможных после 15 испытаний: ●●● –  $N = 2$ ; ■ ■ ■ –  $N = 3$ ; ▲ ▲ ▲ –  $N = 4$

Из рис. 3 следует, что при ограниченном числе начальных дефектов и ограниченном объеме испытаний маловероятно, что все дефекты будут выявлены. Более вероятно, что могут остаться невыявленными не более 1–2 дефекта. Наиболее вероятно, что после испытаний не останется ни одного дефекта с ВНД, соизмеримой с ВБР ТС.

При повышении числа испытаний возрастают вероятности, что останется не более одного дефекта, см. рис. 4.

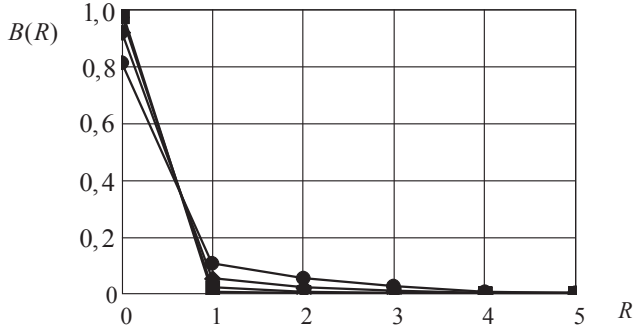


Рис. 4. Статистические вероятности числа невыявленных дефектов ТС из N возможных после 15 испытаний:  
▲▲▲ – N = 2; ■ ■ ■ – N = 3; ● ● ● – N = 5

Хотя условия статистического моделирования не совсем соответствуют условиям, принятым в п. 1.4, полученные результаты подтверждают выводы пп. 1.3 и 1.4, что при ограниченном начальном числе дефектов ТС после ограниченного числа испытаний может остаться невыявленными не более 2 дефектов.

**1.6. Оценка ВБР ТС с учетом невыявленных дефектов**

Оценка ВБР ТС, достигнутой в результате отработочных испытаний, и ее дисперсия зависят от числа R возможных невыявленных дефектов и определяется по зависимости (3) при оценках ВНД (5)

$$\bar{P}_n = \bar{P}_k \prod_{r=0}^R \bar{G}_r; \quad \sigma_{\bar{P}_n}^2 = \bar{P}_n^2 \left( \frac{\sigma_{\bar{P}_k}^2}{\bar{P}_k^2} + R \cdot \frac{\sigma_{\bar{G}_r}^2}{\bar{G}_r^2} \right), \quad (12)$$

где  $\bar{P}_k$  – оценка предельной ВБР ТС после выявления и устранения всех возможных дефектов. В соответствии с МНО такая оценка и ее дисперсия определяются по зависимостям [3, 4]

$$\bar{P}_k = \frac{n+1-m}{n+2}; \quad \sigma_{\bar{P}_k}^2 = \frac{(m+1)(n+1-m)}{(n+2)^2(n+3)}, \quad (13)$$

где m – число случайных отказов ТС при испытаниях (не из-за дефектов).

Из (12) следует, что наличие возможных невыявленных дефектов может значительно снизить достигнутой после испытаний ВБР ТС или ее элементов. Поэтому

важно иметь данные о числе и ВНД возможных дефектов, оставшихся после проведенных отработочных испытаний ТС. По зависимости (12) можно получить различные оценки ВБР ТС. При этом целесообразно учитывать вероятности числа возможных скрытых дефектов, оценки которых получены в пп. 1.3 и 1.4. Оптимистичные оценки ВБР получаются при R=0. Гарантированные оценки ВБР с разной степенью гарантии определяются при R ∈ [1; 2]. Пессимистичные оценки ВБР соответствуют числу скрытых дефектов R > 2. Оценки ВБР ТС и их среднеквадратические отклонения (СКО), получаемые по зависимости (12) с учетом (5) и (13), при некоторых числах испытаний и возможном числе случайных отказов и невыявленных дефектов приведены в таблице.

**Реализации оценок ВБР ТС  $\hat{P}_n$  и их СКО  $\sigma_{\hat{P}_n}$  по результатам испытаний**

Число испытаний n	Число случ. отказов m	Число возможных невыявленных дефектов					
		R = 0		R = 1		R = 2	
		$\hat{P}_n$	$\sigma_{\hat{P}_n}$	$\hat{P}_n$	$\sigma_{\hat{P}_n}$	$\hat{P}_n$	$\sigma_{\hat{P}_n}$
10	0	0,917	0,077	0,840	0,099	0,770	0,112
	1	0,833	0,103	0,764	0,114	0,700	0,120
20	0	0,955	0,043	0,911	0,059	0,870	0,069
	1	0,909	0,060	0,868	0,070	0,828	0,076
30	0	0,969	0,030	0,938	0,041	0,909	0,049
	1	0,938	0,042	0,908	0,050	0,880	0,055

Из таблицы видно, что наличие даже одного невыявленного дефекта заметно снижает оценки ВБР ТС и повышает их погрешности. Из этого следует, насколько важно при испытаниях выявлять и устранять все возможные дефекты ТС.

**2. Оценивание показателей возможных дефектов ТС длительного функционирования по результатам испытаний**

**2.1. Влияние дефектов на интенсивность отказов ТС**

Рассмотрим ТС, работающую непрерывно или периодически. В работе [2] показано, что в начале жизненного цикла ТС может содержать Q дефектов, имеющих случайный характер проявления, показатели которых характеризуются интенсивностями отказов (ИО) ТС  $\Lambda_q, q=0, \dots, Q$  из-за этих дефектов. Далее будем называть их интенсивностями отказов дефектов (ИОД). Для повышения безотказности ТС проводится цикл мероприятий (отработочных, приработочных и контрольных испытаний, опытной эксплуатации и др.), в течение которых осуществляется выявление и устранение различных возможных дефектов. Поэтому в процессе функционирования ТС во времени t по мере устранения дефектов ее ИО снижается [2]:

$$\Lambda_{\text{ТС}}(t) = \Lambda_K + \sum_{q=1}^Q \Lambda_q(t), \quad (14)$$

где  $\Lambda_K$  – предельная (конечная, потенциальная) ИО ТС при отсутствии или выявлении всех возможных дефектов;

$\Lambda_q(t)$  – переменная ИОД.

Если  $q$ -й дефект выявлен в момент  $t_q$  (после периода  $t_q$ ) и полностью устранен путем доработок, то ИОД  $\Lambda_q(t)$  выражается в виде ступенчатой функции

$$\left. \begin{array}{l} \text{при } t \leq t_q \quad \Lambda_q(t) = \Lambda_q; \\ \text{при } t > t_q \quad \Lambda_q(t) = 0. \end{array} \right\} \quad (15)$$

Однако некоторые дефекты даже после цикла отработочных испытаний могут остаться невыявленными. Перенумеруем такие дефекты в виде  $r = 0, 1, \dots, R$ . Если число таких дефектов равно  $R$ , то после испытаний ТС в течение суммарного периода  $T$  при эффективных доработках ИО ТС независимо от числа выявленных дефектов будет равна

$$\Lambda_{\text{ТС}}(T) = \Lambda_K + \sum_{r=0}^R \Lambda_r. \quad (16)$$

Из (16) следует, что возможные невыявленные дефекты (НД) могут повысить ИО и снизить безотказность ТС. Поэтому важной является задача исследования показателей возможных НД.

### 2.2. Оценивание интенсивности отказов ТС из-за возможных дефектов по методу несмещенных оценок

Интенсивности отказов ТС из-за возможных дефектов неизвестны, однако их можно оценить по экспериментальным данным. Если в процессе испытаний ТС  $q$ -й дефект проявился в момент  $t_q$ , то в соответствии с методом несмещенных оценок (МНО) [3, 4] несмещенные точечные оценки ИОД и их дисперсии вычисляются по зависимостям

$$\bar{\Lambda}_q = \frac{2}{t_q}; \quad \sigma_{\bar{\Lambda}_q}^2 = \frac{2}{t_q^2}; \quad q = 1, \dots, Q. \quad (17)$$

После испытаний ТС в течение периода  $T$  могут остаться невыявленные дефекты. ИОД таких дефектов можно оценить по МНО следующим образом. Вероятность безотказной работы ТС в течение периода  $T$  при известной постоянной ИО  $\Lambda$  определяется по экспоненциальному распределению

$$V(T) = e^{-\Lambda T}. \quad (18)$$

Априорную вероятность безотказной работы ТС с известной ИО, соответствующей модели (16), с учетом (18) можно представить в виде

$$V(T) = e^{-\Lambda_K T} \prod_{r=0}^R e^{-\Lambda_r T}. \quad (19)$$

При  $R=0$  (при отсутствии НД) произведение в (19)

равно единице.

Если ИО  $\Lambda_K$  и  $\{\Lambda_r\}$  неизвестны, но ТС проработала безотказно в течение периода  $T$ , то в соответствии с МНО [4] совместная плотность вероятности оценок ИО, которые обозначим соответственно в виде  $\lambda_K$  и  $\{\lambda_r\}$ , пропорциональна вероятности (19)

$$f(\lambda_K, \{\lambda_r\}) = k \cdot e^{-\lambda_K T} \prod_{r=0}^R e^{-\lambda_r T}, \quad (20)$$

где  $k$  – нормирующий множитель.

Из (20) следует, что совместная плотность вероятности (ПВ) оценок ИО является произведением автономных ПВ оценок ИО ТС и ИОД. В частности, ПВ оценок ИО невыявленных дефектов имеет вид

$$f(\lambda_r) = k_r \cdot e^{-\lambda_r T}, \quad r = 1, \dots, R. \quad (21)$$

Нормирующий множитель  $k_r$  определяется из условия

$$\int_0^{\infty} f(\lambda_r) d\lambda_r = 1.$$

С учетом этого для ПВ оценок ИОД невыявленных дефектов получается следующая зависимость:

$$f(\lambda_r) = \left[ \int_0^{\infty} e^{-\lambda_r T} d\lambda_r \right]^{-1} \cdot e^{-\lambda_r T}, \quad r = 1, \dots, R. \quad (22)$$

Заметим, что такая же зависимость (22) для ПВ оценок ИОД получается и в общем случае, когда в (19) и (20) учитываются все результаты испытаний ТС с учетом возможных случайных отказов и отказов из-за дефектов.

На основе ПВ (22) получаются несмещенные оценки ИОД и их дисперсии как первые моменты распределения, одинаковые для всех дефектов:

$$\bar{\Lambda}_r = \int_0^{\infty} \lambda_r f(\lambda_r) d\lambda_r = \frac{1}{T};$$

$$\sigma_{\bar{\Lambda}_r}^2 = \int_0^{\infty} (\lambda_r - \bar{\Lambda}_r)^2 f(\lambda_r) d\lambda_r = \frac{1}{T^2}, \quad r = 1, \dots, R. \quad (23)$$

Из (23) следует, что оценки ИОД всех возможных НД одинаковы. На безотказность ТС влияет прежде всего ИОД возможных НД, так как при эффективных доработках именно они определяют достигнутый уровень ИО ТС по зависимости (16).

### 2.3. Оценивание вероятностей возможного числа невыявленных дефектов ТС по биномиальному распределению

Задача определения числа невыявленных (оставшихся) дефектов ТС или их элементов является некорректной. Для оценивания числа таких дефектов недостаточно информации, по результатам испытаний известны лишь число выявленных дефектов и оценки ИОД (17) выявленных дефектов и ИОД (23) возможных невыявлен-

ных дефектов. Однако на основе результатов испытаний можно оценить вероятности возможного числа оставшихся дефектов на основе биномиального распределения следующим способом.

Вероятность проявления  $q$ -го дефекта в течение суммарного периода  $T$  испытаний ТС определяется по экспоненциальному распределению. Каждый  $q$ -й случайный дефект может проявиться в течение периода  $T$  с вероятностью

$$B_q = 1 - e^{-\Lambda_q \cdot T}, \quad q = 1, \dots, Q. \quad (24)$$

Если испытания проводятся циклами в виде  $n$  испытаний ТС в течение периодов  $T_i$  каждое, то в зависимости (24) используется суммарное время испытаний  $T = \sum T_i$ .

ИОД оценивается по зависимостям (23). Оценки ИОД одинаковы для всех возможных оставшихся дефектов. При этом оценка вероятности того, что дефект не будет выявлен, определяется с учетом (24) по зависимости:

$$\bar{B}_1 = e^{-\frac{1}{T}} = e^{-1}. \quad (25)$$

Предположим, что ТС имеет  $N$  дефектов с известными вероятностями  $B_i$ . В процессе испытаний может быть выявлено  $r$  дефектов и останутся невыявленными  $R \in [0; R_{\max}]$  дефектов, так что  $N = R + r$ . Априорные вероятности числа  $r$  дефектов, выявляемых в течение периода  $T$ , определяются по биномиальному распределению

$$B(r) = C_{R+r}^r \cdot B_1^r \cdot (1 - B_1)^R, \quad R=0, 1, \dots, R_{\max}, \quad (26)$$

где  $C_{R+r}^r$  – число сочетаний из  $R+r$  по  $r$ .

Если число невыявленных дефектов  $R$  неизвестно, но получено число  $r$  выявленных дефектов, то можно определить апостериорные вероятности числа НД на основе формулы Байеса аналогично, как в п. 1.4. В результате получается зависимость (10). Так как при испытаниях дефекты не были выявлены, то в зависимости (9) значение  $r=0$ . Вместо неизвестной вероятности  $B_1$  можно использовать ее оценку (19). Таким образом, на основе (9) с учетом (19) получается следующая зависимость для оценок вероятностей числа невыявленных дефектов

$$B(R) = \left( \sum_{R=0}^{R_{\max}} e^{-R} \right)^{-1} \cdot e^{-R}, \quad R = 0, 1, \dots, R_{\max}. \quad (27)$$

Оценки вероятностей (27) при некоторых значениях возможного максимального числа НД показаны на рис. 5.

Из рис. 5 видно, что с вероятностью  $B \geq 0,90$  после испытаний может остаться не более 1–2 дефектов с ИО, которые оцениваются по зависимостям (17). Наиболее вероятно, что все дефекты с ИО, соизмеримыми с ИО ТС, будут выявлены и устранены. При этом чем больше пери-

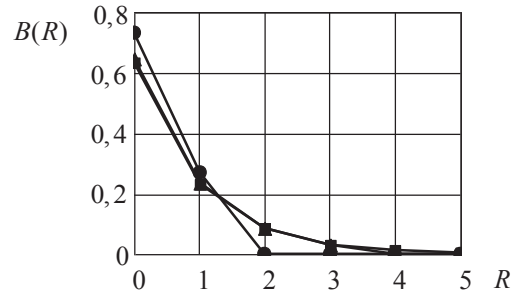


Рис. 5. Оценки вероятностей числа скрытых дефектов при максимально возможном числе НД  $R_{\max}$ : ● –  $R_{\max} = 1$ ; ▲▲▲ –  $R_{\max} = 3$ ; ■■■ –  $R_{\max} = 5$  од испытаний, тем ниже оценки ИО оставшихся дефектов и выше точность этих оценок и, следовательно, слабее влияние их на показатели безотказности ТС.

#### 2.4. Оценка вероятностей возможного числа невыявленных дефектов ТС по методу несмещенных оценок

Вероятности возможного числа невыявленных дефектов можно оценить по МНО [3, 4]. Предположим, что максимальное число НД равно  $R_{\max}$ . В соответствии с МНО вероятности числа НД пропорциональны вероятностям (19). При этом в зависимости (19) используется конкретный период испытаний  $T$ , а в качестве неизвестного числа НД используется его возможное значение  $R$ . Если все ИОД  $\Lambda_i$  одинаковы, то после преобразований получается следующая зависимость для оценок вероятностей числа НД:

$$B(R) = \left[ \sum_{R=0}^{R_{\max}} e^{-\Lambda_i \cdot T \cdot R} \right]^{-1} e^{-\Lambda_i \cdot T \cdot R}. \quad (28)$$

Так как интенсивности отказов ТС из-за НД неизвестны, то используем их несмещенные оценки (23). В результате на основе (28) получим оценки вероятностей возможного числа оставшихся дефектов по МНО

$$B(R) = \left( \sum_{R=0}^{R_{\max}} e^{-R} \right)^{-1} \cdot e^{-R}, \quad R = 0, 1, \dots, R_{\max}. \quad (29)$$

Полученная зависимость совпадает с формулой (27) по биномиальному распределению. Оценки вероятностей возможного числа НД были показаны на рис. 5. На основе результатов пп. 2.3 и 2.4 следует, что при ограниченном числе возможных невыявленных дефектов с вероятностью  $B \geq 0,90$  после испытаний может остаться практически не более 2 дефектов ТС, интенсивности отказов ТС из-за которых оцениваются по зависимостям (23).

#### 2.5. Оценка интенсивности отказов ТС с учетом возможных невыявленных дефектов

На основе результатов исследований можно оценить ИО ТС по результатам испытаний с учетом возмож-

ных скрытых дефектов. Если проведены испытания ТС в течение суммарного периода  $T$  и при этом зафиксировано  $m$  случайных отказов (при которых не были выявлены дефекты и не проведены доработки для их устранения), то точечная оценка достигнутой ИО ТС и ее дисперсия при предполагаемом числе  $R$  невыявленных дефектов с учетом их независимости определяется на основе (16) при оценках входящих в нее параметров

$$\bar{\Lambda}_T = \bar{\Lambda}_K + R \cdot \bar{\Lambda}_r; \quad \sigma_{\bar{\Lambda}_T}^2 = \sigma_{\bar{\Lambda}_K}^2 + R \cdot \sigma_{\bar{\Lambda}_r}^2, \quad (30)$$

где оценки ИО оставшихся (скрытых) дефектов вычисляются по зависимостям (23), а несмещенная оценка предельной ИО ТС и ее дисперсия независимо от числа выявленных при испытаниях и устраненных дефектов определяются по МНО по формулам [3]

$$\bar{\Lambda}_K = \frac{m+1}{T}; \quad \sigma_{\bar{\Lambda}_K}^2 = \frac{m+1}{T^2}. \quad (31)$$

На основе (23) и (31) зависимость (30) для оценки достигнутой ИО ТС и ее дисперсии преобразуется к виду

$$\bar{\Lambda}_T = \frac{m+1+R}{T}; \quad \sigma_{\bar{\Lambda}_T}^2 = \frac{m+1+R}{T^2}. \quad (32)$$

Из (32) следует, что если при испытаниях зафиксированы случайные отказы и (или) не все возможные дефекты выявлены, то оценка достигнутой ИО ТС и ее дисперсия возрастают пропорционально числу случайных отказов и возможных скрытых дефектов. Число возможных оставшихся дефектов  $R$  можно только предполагать. При выборе  $R$  учитываются оценки вероятностей числа таких дефектов, приведенные в пп. 2.3, 2.4. При этом возможны оптимистичные оценки ИО при  $R=0$  и гарантированные оценки при  $R \geq 1$ . Для обеспечения низких оценок ИО ТС по результатам испытаний необходимо, во-первых, выявлять причины каждого отказа и проводить эффективные доработки для его устранения и, во-вторых, создавать условия для выявления всех возможных дефектов.

Заметим, что полученные выше результаты справедливы не только для ТС, но и для их основных подси-

стем и элементов, для которых проводятся автономные отработочные испытания.

### Выводы

На основе проведенных исследований получены следующие основные результаты и выводы.

1. После отработочных испытаний ТС и их элементов на безотказность могут остаться невыявленные дефекты, показатели неоявления которых соизмеримы с показателями безотказности ТС. Такие дефекты могут снизить показатели безотказности ТС при эксплуатации.

2. Показатели возможных невыявленных дефектов (вероятности неоявления дефектов ТС одноразового применения и интенсивности отказов ТС из-за дефектов) можно оценить по результатам испытаний ТС, см. пп. 1.2, 2.2. При увеличении объема испытаний оценки показателей дефектов улучшаются, а их точность возрастает.

3. Исследования показали, что число возможных дефектов, не выявленных после отработочных испытаний ТС как одноразового применения, так и длительно функционирующего, практически не превышает одного или двух, см. пп. 1.3–1.5, 2.3, 2.4. Наиболее вероятно, что все такие дефекты при испытаниях будут выявлены и устранены на основе доработок.

4. Для повышения достоверности контроля показателей безотказности ТС по результатам испытаний необходимо учитывать возможность оставшихся (невыявленных) дефектов. Оценки показателей безотказности ТС с учетом возможных невыявленных дефектов получаются на основе зависимостей, приведенных в пп. 1.6, 2.5. При этом возможны оптимистичные оценки показателей безотказности ТС (при предположении об отсутствии невыявленных дефектов) или гарантийные оценки (при предположении об одном или двух оставшихся дефектах).

### Литература

1. Лукин В.Л., Сухорученков Б.И. Концепция безотказности технических систем. // Двойные технологии, № 3 (64). СИП РИА, 2013.
2. Лукин В.Л., Сухорученков Б.И. Концепция безотказности технических систем длительного функционирования. // Двойные технологии, № 4 (65). СИП РИА, 2013.
3. Лукин В.Л., Сухорученков Б.И. Контроль безотказности технических систем. Юбилейный: Изд. ЗАО «ПСТМ», 2013.
4. Сухорученков Б.И. Анализ малой выборки. Прикладные статистические методы. М.: Вузовская книга, 2010.

Материал поступил в редакцию 29. 09. 2013 г.