

УДК 519.248 + 629.7.01

© Лукин В. Л., Сухорученков Б.И
Lukin V., Sukhoruchenkov B.

СПОСОБ КОНТРОЛЯ ВЕРОЯТНОСТИ БЕЗОТКАЗНОЙ РАБОТЫ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИСПЫТАНИЙ С УЧЕТОМ ВОЗМОЖНЫХ ДЕФЕКТОВ

METHOD OF CONTROL OF PROBABILITY FAULTLESS WORKS OF TECHNICAL SYSTEMS ON RESULTS TESTS TAKING INTO ACCOUNT POSSIBLE DEFECTS

Аннотация. В рамках концепции безотказности технических систем [1] излагается способ контроля вероятности безотказной работы технических систем одноразового использования по результатам испытаний с учетом возможных невыявленных дефектов.

Annotation. Within the framework of conception of faultlessness of the technical systems [1] the method of control of probability of faultless work of the technical systems of the non-permanent use is expounded on results tests taking into account the possible uneduced defects.

Ключевые слова. Техническая система, испытание, дефект, отказ, вероятность безотказной работы, оценка.

Key words. Technical system, test, defect, refuse, probability of faultless work, estimation.

Введение

Рассматриваются технические системы (ТС) одноразового использования типа баллистических и крылатых ракет, ракет-носителей и боеприпасов различного типа. В соответствии с концепцией безотказности ТС [1] в процессе испытаний выявляются и устраняются различные возможные дефекты. Однако при ограниченном числе испытаний ТС могут остаться отдельные существенные дефекты, проявление которых имеет случайный характер и приводит к отказу ТС. Поэтому необходимо иметь способ контроля вероятности безотказной работы (ВБР) ТС по результатам испытаний с учетом возможных невыявленных (оставшихся, скрытых) дефектов.

1. Оценивание достигнутого уровня ВБР ТС без учета невыявленных дефектов

В процессе испытаний ТС на безотказность выявляются возможные дефекты и устраняются на основе доработок. В результате ВБР ТС повышается и доводится до требуемого уровня. Если все возможные дефекты выявлены а доработки эффективны, после которых дефекты полностью устраняются, то оценка конечной ВБР ТС, достигнутой после испытаний, зависит только от числа испытаний n и числа зафиксированных случайных отказов m [2]. Для контроля достигнутой после n испытаний ВБР ТС P_n в этом случае наибольшую точность обеспечивает метод несмещенных оценок (МНО) [3]. В соответствии с МНО сначала по результатам испытаний строится плот-

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.

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.

ность вероятности (ПВ) возможных оценок ВБР, которые обозначим в виде pn . В результате получается конечная зависимость для ПВ [2, 3]

$$f(pn) = (n+1)C_n^m pn^{n-m} (1-pn)^m, \quad (1)$$

где C_n^m – число сочетаний из n по m .

На основе ПВ (1) получаются конечные зависимости для несмещенных точечных оценок ВБР P_n и их дисперсий как для первых моментов распределения [2]

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

Нижняя доверительная граница для ВБР $P_{нн}$ при заданной доверительной вероятности γ определяется численным способом на основе ПВ (1) из соотношения

$$\int_0^{\bar{P}_{нн}} f(pn) dpn = 1 - \gamma. \quad (3)$$

Современный подход к контролю ВБР ТС основан на предположении, что в процессе испытаний все возможные дефекты ТС выявляются и устраняются. Однако, как показано в работе [1], после ограниченного числа испытаний могут остаться отдельные дефекты, которые могут снизить ВБР ТС. Поэтому оценивание достигнутой ВБР ТС по зависимостям (1)–(3) без учета оставшихся дефектов не гарантирует достоверность контроля ВБР ТС по результатам испытаний.

2. Оперативный способ оценивания достигнутой ВБР ТС с учетом возможных невыявленных дефектов

Если после испытаний ТС могут остаться невыявленные дефекты, то для оценивания достигнутой ВБР можно использовать оперативный способ, основанный на предположении о нормальном распределении оценок ВБР, усеченном на отрезке [0; 1]. Допустим, что проведено n испытаний ТС, при которых зафиксировано m случайных отказов. Учтем, что после испытаний могут остаться R невыявленных дефектов, проявление каждого из которых приводит к отказу ТС. Обозначим конечный (предельный) уровень ВБР ТС после устранения всех возможных дефектов в виде P_k . Показатели возможных невыявленных дефектов (НД) будем характеризовать вероятностями непроявления дефектов (ВНД) G_r , $r = 1, \dots, R$. Если показатели P_k и $\{G_r\}$ известны, то достигнутой уровень ВБР ТС после n испытаний определяется по зависимости

$$P_n = P_k \prod_{r=1}^R G_r. \quad (4)$$

Если вероятности P_k и G_r неизвестны, то можно определить их несмещенные оценки и дисперсии по МНО [2, 3]

$$\bar{P}_k = \frac{n+1-m}{n+2}; \quad \sigma_{\bar{P}_k}^2 = \frac{(m+1)(n+1-m)}{(n+2)^2(n+3)}; \quad (5)$$

$$\bar{G}_r = \frac{n+1}{n+2}; \quad \sigma_{\bar{G}_r}^2 = \frac{n+1}{(n+2)^2(n+3)}, \quad r = 1, \dots, R. \quad (6)$$

Оценки показателей всех возможных невыявленных дефектов одинаковы. На основе оценок (5) и (6) по методу линеаризации вычисляется оценка достигнутой ВБР ТС и ее дисперсия по зависимости (4) с учетом равенства показателей дефектов и их взаимной независимости $\bar{P}_n = \bar{P}_k \bar{G}_r^R$; $\sigma_{\bar{P}_n}^2 = (\bar{G}_r^R)^2 \sigma_{\bar{P}_k}^2 + R(\bar{P}_k \bar{G}_r^{R-1})^2 \sigma_{\bar{G}_r}^2$. (7)

Для интервального оценивания ВБР ТС предполагается, что оценка достигнутой ВБР имеет усеченное нормальное распределение с математическим ожиданием и дисперсией, совпадающими с оценками (7): $M_p = \bar{P}_n$ и $\sigma_p^2 = \sigma_{\bar{P}_n}^2$. В этом случае ПВ оценок ВБР записывается в виде

$$f(pn) = C(2\pi)^{-0.5} \sigma_p^{-1} \exp\left[-\frac{1}{2\sigma_p^2}(x-M_p)^2\right], \quad (8)$$

где C – нормирующий множитель, вычисляемый по зависимости

$$C = \left[\int_0^1 f(pn) dpn \right]^{-1}. \quad (9)$$

Нижняя доверительная граница для достигнутой ВБР $P_{нн}$ при заданной доверительной вероятности γ определяется численным способом на основе ПВ (8) из соотношения (3).

Изложенный способ позволяет оперативно оценить достигнутой уровень ВБР ТС, однако при этом оценки ВБР могут иметь смещение даже при несмещенных оценках параметров (5) и (6).

3. Точный способ оценивания достигнутой ВБР ТС с учетом возможных невыявленных дефектов

Для корректного оценивания достигнутой ВБР ТС необходимо построить ПВ оценок ВБР. Используем для этого численный способ дискретизации возможных оценок. Как и в п. 2, обозначим конечный уровень ВБР ТС после устранения всех возможных дефектов в виде P_k , а показатели возможных НД в виде G_r , $r = 1, \dots, R$. Если показатели P_k и $\{G_r\}$ неизвестны, то в соответствии с МНО плотности вероятности возможных оценок, которые обозначим в виде pk и $\{g_r\}$ соответственно, определяются по зависимостям [2, 3]

$$fp(pk) = (n+1)C_n^m pk^{n-m} (1-pk)^m; \quad (10)$$

$$f(g_r) = (n+1)g_r^n, \quad (11)$$

где C_n^m – число сочетаний из n по m .

Обозначим возможную оценку ВБР ТС, достигнутой после n испытаний, в виде pn . В соответствии с (4) эта оценка зависит от оценок показателей pk и $\{g_r\}$

$$pn = pk \prod_{r=1}^R g_r. \quad (12)$$

ПВ оценок ВБР строится численным способом по следующему алгоритму. Для упрощения записей допустим, что число невыявленных дефектов равно $R=2$. При необходимости алгоритм можно обобщить для случая $R \geq 3$. Задаются диапазоны возможных значений оценок показателей, входящих в зависимость (12) $pn \in [pno; 1]$, $pk \in [pko; 1]$, $g_r \in [go; 1]$. Эти диапазоны разделяются на Nn , Np и Ng малых отрезков длительностью $hn=(1-po)/Nn$, $hp=(1-po)/Np$ и $hg=(1-go)/Ng$ соответственно. Выделяются i -е отрезки для оценок pk_i , $i=1, \dots, Np$, с центрами $pk_i = pko + (i-0,5)hp$ и вычисляются вероятности попадания оценок pk на эти отрезки на основе ПВ (10)

$$Bk_i(pk_i) = (n+1)C_n^m pk_i^{n-m} (1-pk_i)^m hp, \quad i=1, \dots, Np. \quad (13)$$

При $R=2$ выделяются j -е и μ -е отрезки для оценок g_1 и g_2 , $j=1, \dots, Ng$, $\mu=1, \dots, Ng$, с центрами $g_{1j} = go + (j-0,5)hg$ и $g_{2\mu} = go + (\mu-0,5)hg$ и вычисляются вероятности попадания оценок g_1 и g_2 на эти отрезки на основе ПВ (11)

$$Bg_{1j} = (n+1)g_{1j}^n hg, \quad j=1, \dots, Ng; \quad (14)$$

$$Bg_{2\mu} = (n+1)g_{2\mu}^n hg, \quad \mu=1, \dots, Ng. \quad (15)$$

Определяются возможные оценки достигнутой ВБР ТС в центральных точках локальных ячеек $ij\mu$ с координатами $pk_i, g_{1j}, g_{2\mu}$ по зависимости (12) при $R=2$

$$p_{ij\mu} = pk_i g_{1j} g_{2\mu}; \quad i=1, \dots, Np, \quad j=1, \dots, Ng, \quad \mu=1, \dots, Ng. \quad (16)$$

Вычисляются вероятности попадания оценок достигнутой ВБР ТС в $ij\mu$ -е ячейки с объемами $V_{ij\mu} = hp \cdot hg \cdot hg$ на основе вероятностей (13)–(15)

$$B_{ij\mu} = Bk_i Bg_{1j} Bg_{2\mu}, \quad i=1, \dots, Np, \quad j=1, \dots, Ng, \quad \mu=1, \dots, Ng. \quad (17)$$

Для построения ПВ оценок достигнутой ВБР выделяются v -е отрезки возможных значений ВБР P_n с центрами $pn_v = pno + (v-0,5)hn$, $v=1, \dots, Nn$. Для каждого v -го отрезка из совокупности вероятностей $\{B_{ij\mu}\}$ (17) выбираются такие, которые относятся к ячейкам с координатами (16) при $p_{ij\mu} \in [pn_v - 0,5hn; pn_v + 0,5hn]$, и им присваиваются новые номера B_{vq} , $q=1, \dots, Q_v$. На основе этих вероятностей вычисляются вероятности оценок ВБР (вероятности попадания достигнутой ВБР на каждый v -й отрезок)

$$B_{nv} = \sum_{q=1}^{Q_v} B_{vq}, \quad v=1, \dots, Nn. \quad (18)$$

На основе вероятностей (18) определяются плотности вероятности оценок достигнутой ВБР в дискретных точках pn_v по зависимостям

$$fn(pn_v) = B_{nv} / hn, \quad v=1, \dots, Nn. \quad (19)$$

Непрерывная ПВ оценок достигнутой ВБР $fn(pn)$ в пределах $[pno; 1]$ восстанавливается на основе дискретных значений (19) численными методами интерполяции и экстраполяции. Точность построенной таким образом ПВ возрастает при увеличении числа точек дискретизации Nn , Np и Ng , но при этом возрастает и трудоемкость вычислений. Для компромисса между точностью и трудоемкостью можно рекомендовать выбор этих значений в диапазонах $Nn \in [50; 100]$, $Np \in [100; 200]$, $Ng \in [100; 200]$.

При одном возможном невыявленном дефекте (при $R=1$) изложенный алгоритм или корректируется, или для второго дефекта задается постоянная ПВ (11) $fr(gr) = 1/(1-go)$. В случае необходимости при $R > 2$ в алгоритм вводятся дополнительные дефекты с учетом плотности вероятности этих дефектов. Однако, как показано в работе [4], с высокой вероятностью после испытаний ТС может остаться не более двух невыявленных дефектов ТС.

ПВ оценок достигнутой ВБР ТС является исчерпывающей характеристикой оценок как случайных величин. На основе такой ПВ можно определить как несмещенные точечные оценки ВБР и их дисперсии, так и интервальные оценки ВБР. Если определены вероятности (18) или ПВ (19) в дискретных точках $v=1, \dots, Nn$, то несмещенные точечные оценки достигнутой ВБР ТС и их дисперсии вычисляются как первые моменты распределения по зависимостям

$$\bar{P}_n = \sum_{v=1}^{Nn} p_n; \quad B_{nv} = \sum_{v=1}^{Nn} p_n \cdot fn(pn_v) hn; \quad (20)$$

$$\sigma_{\bar{P}_n}^2 = \sum_{v=1}^{Nn} (p_n - \bar{P}_n)^2; \quad B_{nv} = \sum_{v=1}^{Nn} (p_n - \bar{P}_n)^2 \cdot fn(pn_v) hn. \quad (21)$$

Оценка нижней доверительной границы \bar{P}_{nH} для достигнутой ВБР ТС при заданной доверительной вероятности γ определяется из соотношения (3) на основе непрерывной ПВ оценок ВБР $f(pn)$, восстановленной по дискретным значениям (19).

4. Сравнение способов оценивания достигнутой ВБР ТС

4.1. Сравнение ПВ оценок ВБР ТС, построенных разными способами

Проведем сравнение ПВ оценок достигнутой ВБР ТС, построенных оперативным и точным способами, см. п. 2 и 3, по результатам $n=15$ испытаний ТС при отсутствии или при одном ($m=1$) случайном отказе и при предположении, что могут остаться 1 или 2 скрытых дефекта. При $R=1$ ПВ строилась по алгоритму п. 3, скорректированному с учетом только одного дефекта. ПВ оценок ВБР при вариациях параметров m и R показаны на рис.1–рис. 4.

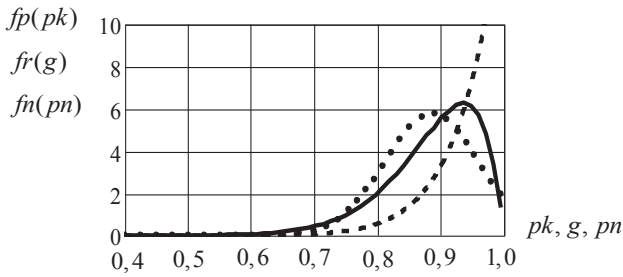


Рис. 1. ПВ оценок ВБР при $m=0$ и $R=1$:
 - - - - - ПВ (10) оценок ВБР P_k и ПВ (11) ВНД G_1 ;
 ПВ (8) оценок достигнутой ВБР P_n ;
 ——— ПВ (19) оценок достигнутой ВБР P_n^*

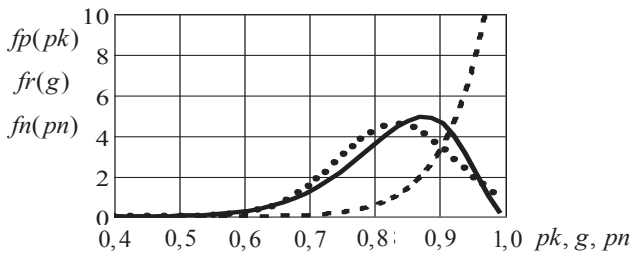


Рис. 3. ПВ оценок ВБР при $m=0$ и $R=2$:
 - - - - - ПВ (10) оценок ВБР P_k и ПВ (11) ВНД G_1 и G_2 ;
 ПВ (8) оценок достигнутой ВБР P_n ;
 ——— ПВ (19) оценок достигнутой ВБР P_n^*

Плотности вероятности оценок ВБР при других объемах испытаний ТС аналогичны показанным на рис.1 – рис. 4. Анализ рис. 1 – рис. 4 показывает, что ПВ оценок достигнутой ВБР ТС существенно отличается от ПВ (10) оценок ВБР без учета невыявленных дефектов. При этом ПВ оценок достигнутой ВБР, построенные по способу пп. 2 или 3, различаются незначительно. Поэтому при инженерных расчетах для построения ПВ оценок достигнутой ВБР ТС по результатам испытаний можно использовать оперативный способ, изложенный в п. 2. Из рис. 1–рис. 4 видно, что диапазон возможных значений ВБР смещается влево при наличии даже одного случайного отказа ТС. Поэтому для повышения ВБР ТС необходимо при каждом отказе ТС достоверно выяснять причины отказа и, главное, проводить эффективные доработки ТС для устранения причин отказа. ПВ оценок ВБР зависит от числа предполагаемых оставшихся дефектов R . При отсутствии дефектов (при $R=0$) ПВ оценок ВБР совпадает с ПВ оценок конечной ВБР P_k , см. рис. 1–рис. 4. При $R=1$ или $R=2$ диапазон возможных значений оценок ВБР значительно смещается в сторону меньших значений ВБР. Поэтому выбор возможного числа невыявленных дефектов может существенно повлиять на оценки ВБР ТС по результатам испытаний. При выборе числа дефектов можно учитывать вероятности возможного

числа оставшихся дефектов, исследованные в работе [4].

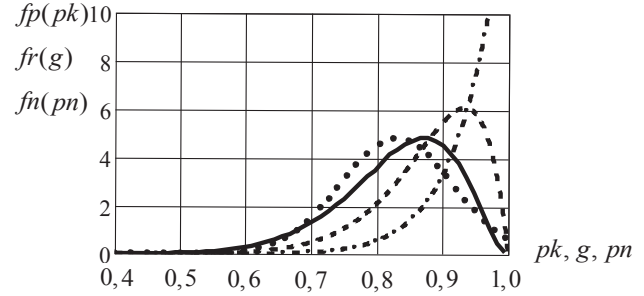


Рис. 2. ПВ оценок ВБР при $m=1$ и $R=1$:
 - - - - - ПВ (10) оценок ВБР P_k ;
 - . . . - ПВ (11) оценок ВНД G_1 ;
 ПВ (8) оценок достигнутой ВБР P_n ;
 ——— ПВ (19) оценок достигнутой ВБР P_n^*

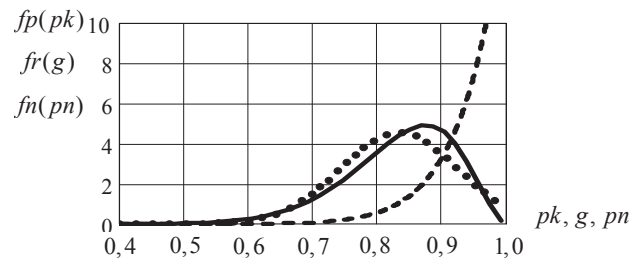


Рис. 4. ПВ оценок ВБР при $m=1$ и $R=2$:
 - - - - - ПВ (10) оценок ВБР P_k ;
 - . . . - ПВ (11) оценок ВНД G_1 и G_2 ;
 ПВ (8) оценок достигнутой ВБР P_n ;
 ——— ПВ (19) оценок достигнутой ВБР P_n^*

4.2. Сравнение оценок достигнутой ВБР ТС, полученных разными способами

Значения точных оценок достигнутой ВБР ТС P_n и их среднеквадратических отклонений (СКО) σ_{P_n} , а также нижней доверительной границы для ВБР при доверительной вероятности $\gamma=0,90$, получаемые по способам пп. 2 и 3 при некоторых результатах испытаний, приведены в табл. 1. Здесь же показаны оценки ВБР при отсутствии оставшихся дефектов (при $R=0$), совпадающие с оценками ВБР P_k по зависимостям (5).

Из табл. 1 видно, что при возрастании числа случайных отказов и числа возможных невыявленных дефектов оценки ВБР ТС существенно уменьшаются, а их погрешности возрастают. Поэтому если оставшиеся дефекты не учитывать, то снижается достоверность контроля достигнутой при испытаниях ВБР ТС. Видно также, что точные оценки ВБР и их СКО, получаемые точным и оперативным способами (см. пп. 3 и 2), полностью совпадают, а интервальные оценки ВБР отличаются незначительно. Поэтому при контроле ВБР ТС по результатам испытаний с учетом возможных невыявленных дефектов можно использовать оперативный способ, изложенный в п. 2.

Таблица 1

Оценки достигнутой ВБР ТС по точному способу п. 3 (жирный шрифт)
и по оперативному способу п. 2 (обычный шрифт)

Результаты испытаний		Оценки ВБР ТС при R = 0			Оценки ВБР ТС при R = 1			Оценки ВБР ТС при R = 2		
n	m	\bar{P}_n	$\sigma_{\bar{P}_n}$	$\bar{P}_{нн}$	\bar{P}_n	$\sigma_{\bar{P}_n}$	$\bar{P}_{нн}$	\bar{P}_n	$\sigma_{\bar{P}_n}$	$\bar{P}_{нн}$
10	0	0,917	0,077	0,811	0,840 0,840	0,099 0,099	0,699 0,710	0,769 0,769	0,111 0,111	0,604 0,605
	1	0,833	0,103	0,690	0,763 0,763	0,114 0,114	0,603 0,621	0,699 0,699	0,119 0,119	0,532 0,534
15	0	0,941	0,055	0,866	0,886 0,886	0,074 0,074	0,780 0,789	0,833 0,833	0,085 0,085	0,708 0,716
	1	0,882	0,076	0,778	0,830 0,830	0,087 0,087	0,710 0,720	0,782 0,782	0,094 0,094	0,645 0,653
20	0	0,955	0,043	0,896	0,911 0,911	0,059 0,059	0,826 0,834	0,868 0,868	0,069 0,069	0,767 0,776
	1	0,909	0,060	0,827	0,868 0,868	0,070 0,070	0,768 0,779	0,828 0,828	0,076 0,076	0,715 0,725
30	0	0,969	0,030	0,928	0,938 0,938	0,041 0,041	0,878 0,884	0,905 0,905	0,050 0,050	0,833 0,845
	1	0,938	0,042	0,880	0,908 0,908	0,050 0,050	0,837 0,844	0,880 0,880	0,056 0,056	0,796 0,808

Таблица 2

Вероятности числа возможных невыявленных дефектов ТС В(R) после n испытаний

5. Рекомендации по контролю ВБР ТС с учетом невыявленных дефектов

Из табл. 1 следует, что выбор числа возможных оставшихся дефектов существенно влияет на оценки достигнутой ВБР ТС по результатам испытаний. Для обоснованного выбора числа таких дефектов можно учесть вероятности числа возможных невыявленных дефектов, которые можно определить с учетом возможного отсутствия дефектов (при R=0) по зависимости [4]

$$B(R) = \left[\sum_{R=0}^{R_{max}} \left(\frac{n+1}{n+2} \right)^{n \cdot R} \right]^{-1} \left(\frac{n+1}{n+2} \right)^{n \cdot R}; R=0,1,\dots,R_{max}. \quad (22)$$

Вероятности (22) при некоторых числах испытаний приведены в табл. 2.

По формулам (7), (20)–(21) можно получить несколько вариантов оценок достигнутой ВБР ТС в зависимости от числа R возможных невыявленных дефектов. Таким оценкам соответствуют разные вероятности (уровень гарантии) α . При числе испытаний $n \in [10; 30]$ с учетом данных табл. 2 можно получить следующие группы оценок ВБР ТС:

- оптимистичные: при R=0 с гарантией $\alpha=0,58-0,62$;
- гарантированные: при R=1 с гарантией $\alpha=0,83-0,86$;
- при R=2 с гарантией $\alpha=0,93-0,95$.

Уровень гарантии при контроле достигнутой ВБР ТС должен выбирать ЛПР (лицо, принимающее решение) в зависимости от важности решаемой задачи.

Число испытаний, n	Возможное число дефектов, R						
	0	1	2	3	4	5	6
10	0,58	0,25	0,10	0,04	0,02	0,01	0
15	0,59	0,24	0,10	0,04	0,02	0,01	0
20	0,61	0,24	0,10	0,04	0,01	0	0
30	0,62	0,24	0,09	0,04	0,01	0	0

Выводы

На основе проведенных исследований получены следующие основные результаты.

Обоснованы оперативный (п. 2) и точный (п. 3) способы оценивания достигнутой ВБР ТС однократного использования по результатам испытаний с учетом возможных дефектов, не выявленных при испытаниях.

Проведено сравнение способов оценивания ВБР ТС и показано, что оперативный способ, см. п. 2, обеспечивает получение практически таких же оценок ВБР, что и точный способ.

Показано, что для повышения достоверности контроля, достигнутой после испытаний ВБР ТС, необходимо учитывать возможные невыявленные дефекты.

Оценки ВБР ТС существенно зависят от числа возможных невыявленных дефектов, см. табл. 1.

Приведены вероятности возможного числа невыявленных дефектов (табл. 2), на основе которых можно получить различные оценки ВБР ТС в зависимости от заданного гарантийного уровня.

Изложенные способы контроля ВБР ТС с учетом возможных невыявленных дефектов могут использоваться для повышения достоверности контроля ВБР ТС, достигнутой при испытаниях.

Литература

1. Лукин В.Л., Сухорученков Б.И. Концепция безотказности технических систем. // Двойные технологии, № 4 (65). СИП РИА, 2013.
2. Лукин В.Л., Сухорученков Б.И. Контроль безотказности технических систем. Юбилейный: Изд. ЗАО «ПСТМ», 2013.
3. Сухорученков Б.И. Анализ малой выборки. Прикладные статистические методы. М.: Вузовская книга, 2010.
4. Сухорученков Б.И., Окороков М.В. Оценки показателей возможных дефектов технических систем, не выявленных после отработочных испытаний. // Двойные технологии, № 1 (66). СИП РИА, 2014.

Материал поступил в редакцию 25. 02. 2014 г.