

УДК 62-192: 519.248 + 629.7.017.1

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

ИССЛЕДОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕРОЯТНОСТИ БЕЗОТКАЗНОЙ РАБОТЫ ОБРАЗЦОВ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

THE INVESTIGATION OF THE STATE PROBABILITY DESIGNS OF COMPLEX TECHNICAL SYSTEMS

Аннотация. Приводятся результаты исследований распределения возможных значений вероятности безотказной работы (ВБР) образцов сложных технических систем (СТС) в течение периода целевого применения в зависимости от основных конструктивных и производственных факторов. Показано, что при стабильных условиях изготовления и эксплуатации ВБР образцов СТС имеет узкий диапазон возможных вариаций. Это позволяет оценить показатели безотказности совокупности СТС по результатам испытаний ограниченного числа образцов СТС.

Annotation. The results of studies of possible values of the probability distribution of uptime (PDU) of samples of complex technical systems (CTS) during the period of the target application, depending on the basic design and production factors. It is shown that under stable conditions of production and operation of the marine living resources of the PDU has a narrow range of possible variations. This allows us to estimate indicators of reliability of the CTS on the results of the testing of a limited number of samples of CTS.

Ключевые слова. Сложная техническая система, элементы системы, вероятность безотказной работы, нормальное, равномерное и экспоненциальное распределения.

Key words. Complex technical system, elements of the system, the probability of trouble-free operation, normal, uniform and the exponential distribution.

1. Постановка задачи исследований

Рассматриваются сложные технические системы (СТС) одноразового применения типа изделий ракетно-космической техники (РКТ) (баллистические и крылатые ракеты, зенитные ракеты и противоракеты, ракеты-носители и др.). Эффективность целевого применения СТС в значительной мере зависит от безотказности СТС. Для контроля соответствия безотказности СТС предъявляемым требованиям и планирования целевого применения СТС необходимо иметь данные о показателях безотказности СТС. Такие данные получаются на основе испытаний на безотказность ограниченного числа образцов СТС [2, 3].

Безотказность СТС зависит от показателей безотказности элементов, которые изменяются в течение жизненного цикла СТС [2]. Однако даже на отдельном отрезке жизненного цикла показатели безотказности элементов СТС могут изменяться в некоторых пределах из-за вариаций характеристик материалов, воздействий окружающей среды, условий производства, эксплуатации и целевого применения. Соответственно варьируются и показатели безотказности СТС. Это создает дополнительные трудности при оценивании показателей безотказности совокупности СТС по испытаниям выборки образцов СТС. Поэтому возникают задачи проведения исследований характера возможных вариаций показателей безотказности об-

Лукин Владимир Леонидович – доктор технических наук, профессор, академик-секретарь секции "Инженерные проблемы стабильности и конверсии", Российская инженерная академия, 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.

разцов СТС и корректности распространения результатов испытаний ограниченной выборки образцов на всю совокупность СТС. Такие задачи решаются далее.

Рассмотрим СТС, которая состоит из подсистем и элементов и имеет сложную иерархическую структуру, пример которой показан на рис. 1. В дальнейшем для удобства СТС будем также называть просто системой, а входящие в нее подсистемы – элементами.

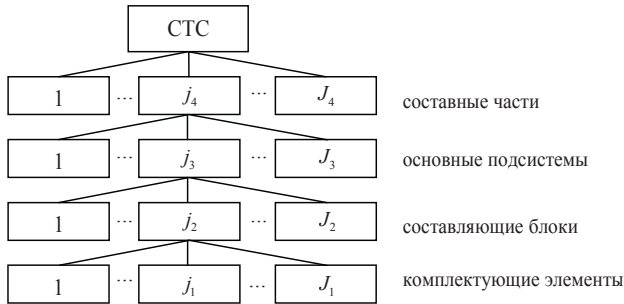


Рис. 1. Структурная схема СТС

Рассмотрим в качестве основного показателя безотказности вероятность безотказной работы СТС. СТС типа изделий РКТ при целевом применении функционируют во времени. Поэтому безотказность каждого j -го элемента и СТС в целом будем характеризовать вероятностью безотказной работы (ВБР) P_j и P соответственно в течение периода целевого функционирования СТС.

Исследования проведем при следующих условиях и допущениях.

Изготовление и сборка СТС производится в соответствии с иерархической структурой.

Технология изготовления, монтажа и контроля качества отлажена и стабильна, так что элементы имеют высокую ВБР и обеспечивают ВБР СТС на уровне $P \geq 0,95$.

Для безотказной работы СТС и подсистем необходимо, чтобы все элементы работали безотказно; поэтому ВБР P любой системы, состоящей из J элементов, каждый из которых имеет ВБР P_j , определяется по зависимости

$$P = \prod_{j=1}^J P_j. \quad (1)$$

Элементы одного уровня иерархии имеют примерно одинаковый уровень ВБР в соответствии с принципом равнонадежности элементов.

ВБР каждого элемента нижнего уровня иерархии P_j может варьироваться как случайная величина с некоторой плотностью вероятности (ПВ) $f(p_j)$ из-за возможных вариаций условий изготовления, сборки, контроля и эксплуатации, влияющих на безотказность. В этом случае ВБР разных образцов СТС, состоящих из элементов, также будет варьироваться как случайная величина с неко-

торой ПВ $f(p)$. Далее исследуется характер распределения вариаций ВБР СТС как случайной величины.

2. Методика определения плотности вероятности вариаций ВБР системы в зависимости от распределения вариаций ВБР элементов

Рассмотрим вначале два соседних уровня иерархии СТС, приведенной на рис. 1. Система верхнего уровня (назовем ее просто система) комплектуется из J элементов нижнего уровня, которые имеют ВБР $P_j, j = 1, \dots, J$. Если ВБР элементов P_j являются случайными, то ВБР системы также случайна. Если задать плотности вероятности $f(p_j)$ вариаций P_j , то на основе (1) можно определить ПВ вариаций ВБР системы различными методами. Приведем один из численных методов, реализуемый на ЭВМ.

Рассмотрим вначале систему, состоящую из двух элементов ($J = 2$), вариации ВБР которых имеют ПВ $f_1(p_1)$ и $f_2(p_2)$. Разобьем диапазоны возможных значений ВБР элементов P_1 и P_2 на одинаковые отрезки длиной Δ_1 и Δ_2 с центрами $p_{1\nu}$ и $p_{2\mu}, \nu = 1, \dots, N, \mu = 1, \dots, M$. На основе ПВ $f_1(p_1)$ и $f_2(p_2)$ определим плотности $f(p_{1\nu})$ и $f(p_{2\mu})$ при значениях $p_{1\nu}$ и $p_{2\mu}$. Вычислим вероятности попаданий значений P_1 и P_2 на отдельные отрезки

$$\begin{aligned} \text{Вер}(p_{1\nu}) &= f(p_{1\nu}) \cdot \Delta_1, \nu = 1, \dots, N; \\ \text{Вер}(p_{2\mu}) &= f(p_{2\mu}) \cdot \Delta_2, \mu = 1, \dots, M. \end{aligned} \quad (2)$$

Точность вычислений по зависимостям (2) тем выше, чем меньше отрезки Δ_1 и Δ_2 и чем ближе плотности вероятности к прямым линиям на этих отрезках. Дальнейшие вычисления удобно проводить с помощью табл. 1, в верхних строках и левых столбцах которой приведены значения $p_{1\nu}$ и $p_{2\mu}$ и соответствующие им вероятности.

На основе данных табл. 1 последовательно перебираются все номера $\nu = 1, \dots, N, \mu = 1, \dots, M$ и вычисляются возможные значения ВБР системы $p_{\nu\mu}$ и вероятности попаданий ВБР системы на соответствующие прямоугольные участки $\Delta_1 \times \Delta_2$ с центрами $(p_{1\nu}, p_{2\mu})$

$$p_{\nu\mu} = p_{1\nu} \cdot p_{2\mu}; \text{Вер}(p_{\nu\mu}) = \text{Вер}(p_{1\nu}) \cdot \text{Вер}(p_{2\mu}). \quad (3)$$

Эти значения сводятся в табл. 1. По полученным данным определяется ПВ ВБР системы $f(p)$ следующим образом. Возможный диапазон значений ВБР системы $P \in [0; 1]$ разбивается на одинаковые отрезки длиной Δ с центрами $p_q, q = 1, \dots, Q$. Число отрезков должно быть достаточным для построения гистограммы распределения и восстановления по ней непрерывной плотности вероятности вариаций ВБР системы. Для каждого q -го отрезка с границами $p_q \pm 0,5\Delta$ из табл. 1 выбираются значения $p_{\nu\mu}$, попадающие на этот отрезок, и соответствующие им вероятности $\text{Вер}(p_{\nu\mu})$, которые перенумеровываются к

Таблица 1

Пример вычисления плотности вероятности ВБР системы с двумя элементами

Значения второго элемента		Значения p_{1v} первого элемента					
		p_{11}	p_{12}	...	p_{1v}	...	p_{1N}
p_{2u}	Вер(p_{2u})	Вероятности Вер(p_{1v})					
		Вер(p_{11})	Вер(p_{12})	...	Вер(p_{1v})	...	Вер(p_{1N})
p_{21}	Вер(p_{21})	w	w	...	w	...	w
		w	w	...	w	...	w
...
p_{2u}	Вер(p_{2u})	w	w	...	p_{vu}	...	w
		w	w	...	Вер(p_{vu})	...	w
...
p_{2M}	Вер(p_{2M})	w	w	...	w	...	w
		w	w	...	w	...	w

виду Вер(q, r), $r = 1, \dots, R_q$, где R_q – число значений p_{vr} , попавших на q -й отрезок. На основе этих значений вычисляются вероятности попадания значений ВБР системы на q -е отрезки

$$\text{Вер}(p_q) = c \sum_{r=1}^{R_q} \text{Вер}(q, r), \quad q = 1, \dots, Q, \quad (4)$$

где c – нормирующий коэффициент, определяемый из условия

$$\sum_{q=1}^Q \text{Вер}(p_q) = 1. \quad (5)$$

Коэффициент c может отличаться от 1 из-за не точности зависимостей (2). По вероятностям (4) определяется плотность вероятности значений ВБР системы как случайной величины в дискретных точках p_q

$$f(p_q) = \text{Вер}(p_q) / \Delta, \quad q = 1, \dots, Q. \quad (6)$$

По этим значениям восстанавливается непрерывная зависимость для ПВ вариаций ВБР системы $f(p)$ численными методами интерполяции и экстраполяции.

Для системы с числом элементов $J > 2$ ПВ вариаций ВБР определяется также по изложенному методу. Для этого последовательно формируются блоки по 2 элемента и объединяются в подсистемы по 2 блока, и т.д., пока не будет получена система с заданным числом элементов.

Приведенный метод используется далее при различных возможных типах распределений вариаций ВБР элементов. Исследования показали, что для достижения наибольшего уровня безотказности системы из всех возможных теоретических типов распределений вариаций ВБР элементов с одинаковыми первыми двумя моментами распределения самым неблагоприятным является равномерное распределение, а самым благоприятным – экспоненциальное распределение. Далее приведены результаты исследований распределения вариаций ВБР системы на основе этих типов распределения ВБР элементов.

3. Распределение вариаций ВБР системы при равномерном распределении ВБР элементов

Исследуем распределение вариаций ВБР системы при равномерном распределении вариаций ВБР элементов $P_j \in [P_{jn}; 1]$ с математическими ожиданиями (МО) $MP_j = 0,5(P_{jn} + 1)$. Для упрощения расчетов без ущерба для общности допустим, что распределения ВБР всех элементов одинаковы: $P_{jn} = \text{const} = P_n$. Вычисления проведем по методике п. 2 при различном числе элементов J в системе и при предельно низкой ВБР элементов $P_n = 0,98$. Результаты вычислений представлены на рис. 2. Для наглядности плотности вероятности показаны в разных уменьшенных масштабах пропорционально коэффициенту $k \in [0,02; 0,05]$.

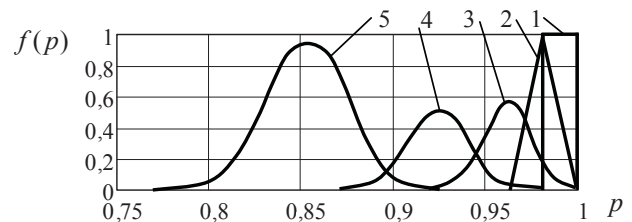


Рис. 2. Плотности вероятности вариаций ВБР системы при равномерном распределении ВБР элементов: 1- $J = 1, k = 0,02$; 2- $J = 2, k = 0,02$; 3- $J = 4, k = 0,02$; 4- $J = 8, k = 0,03$; 5- $J = 16, k = 0,05$

Из рис. 2 видно, что при увеличении числа элементов J распределение ВБР системы приближается к нормальному, практически уже при $J \geq 8$. При этом математическое ожидание ВБР системы смещается влево относительно значения $P = 1$. Аналогичная картина наблюдается и при более высокой ВБР элементов (при $P_n > 0,98$). Характер распределения ВБР системы обладает устойчивостью и в случае, если элементы имеют разные уровни ВБР.

4. Распределение вариаций ВБР системы при экспоненциальном распределении ВБР элементов

Рассмотрим наиболее благоприятный для ВБР системы случай, когда вариации ВБР элементов имеют экспоненциальное распределение с ПВ вида:

$$f(p_j) = (a_j + 1) p_j^{a_j} \tag{7}$$

Распределение ВБР системы определим по методике п. 2. Для упрощения расчетов допустим, что распределения ВБР элементов одинаковы (коэффициенты $a_j = \text{const} = a$). При расчетах примем предельно низкое математическое ожидание ВБР элементов $MP_j = 0,995$, что соответствует плотности (7) с коэффициентом $a_j = 200$. Полученные плотности вероятности ВБР системы при различном числе элементов показаны на рис. 3. Для наглядности плотности показаны в разных уменьшенных масштабах пропорционально коэффициенту $k \in [0,01; 0,05]$.

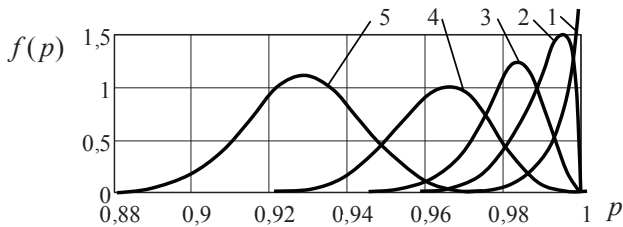


Рис. 3. Плотности вероятности вариаций ВБР системы при экспоненциальном распределении ВБР элементов: 1-J=1, k=0,01; 2-J=2, k=0,02; 3-J=4, k=0,02; 4-J=8, k=0,03; 5-J=16, k=0,05

Из рис. 3 видно, что при увеличении числа элементов распределение ВБР системы приближается к нормальному, практически уже при $J \geq 8$. Такой же характер распределения ВБР системы наблюдается и при более высоких ВБР элементов, и при разных уровнях ВБР элементов.

На основе результатов проведенных исследований и сравнения данных рис. 3 с рис. 2 можно сделать вывод, что независимо от типа распределения вариаций ВБР элементов распределение вариаций ВБР системы при числе элементов $J > 8$ становится близким к нормальному. Таким образом, элементы в иерархической структуре СТС, см. рис. 1, состоящие из элементов нижних уровней иерархии численностью $J > 8$, имеют практически нормальное распределение вариаций ВБР. Дальнейшие исследования проведем с учетом этого результата.

5. Оперативный метод определения плотности вероятности вариаций ВБР системы

Метод построения ПВ вариаций ВБР системы, изложенный в п. 2 и опробованный в пп. 3 и 4, является трудоемким, особенно при большом числе элементов в системе. Для оперативности вычислений можно использо-

вать приближенный метод, основанный на линеаризации зависимости (1). Представим ВБР элементов в виде

$$P_j = 1 - \theta_j, \quad j = 1, \dots, J, \tag{8}$$

где θ_j – вероятность отказа j -го элемента.

Так как ВБР элементов СТС $P_j > 0,99$, то ВБР системы по зависимости (1) с учетом (8) можно записать в линеаризованном виде с точностью до элементов 2-го порядка малости

$$P \cong \prod_{j=1}^J (1 - \theta_j) \cong 1 - \sum_{j=1}^J \theta_j \tag{9}$$

Представим ВБР системы в виде

$$P = 1 - \theta, \tag{10}$$

где θ – вероятность отказа системы.

Тогда на основе (9) получим практически линейную зависимость вероятности отказа системы от вероятности отказов элементов:

$$\theta \cong \sum_{j=1}^J \theta_j \tag{11}$$

В соответствии с центральной предельной теоремой [1] при достаточном числе элементов $J > 5-10$ и любых типах распределений случайных величин θ_j с примерно одинаковыми математическими ожиданиями и дисперсиями распределение величины θ как суммы случайных величин соответствует нормальному. Плотность вероятности вариаций ВБР системы с учетом линейной зависимости (10) совпадает с плотностью вероятности отказов θ с точностью до математического ожидания. Таким образом, подтверждается полученный ранее вывод о том, что распределение вариаций ВБР системы является практически нормальным. Параметры распределения ВБР (МО M_p и дисперсию σ_p^2) с учетом (8)–(11) можно определить по приближенным оперативным зависимостям

$$M_p \cong 1 - \sum_{j=1}^J (1 - M_{pj}); \quad \sigma_p^2 \cong \sum_{j=1}^J \sigma_{pj}^2, \tag{12}$$

где M_{pj}, σ_{pj} – МО и СКО вариаций ВБР элементов.

Более точные зависимости для параметров распределения ВБР системы получаются на основе соотношения (1)

$$M_p = \prod_{j=1}^J M_{pj}; \quad \sigma_p^2 = (M_p)^2 \sum_{j=1}^J \frac{\sigma_{pj}^2}{(M_{pj})^2} \tag{13}$$

Пример 1. Система состоит из 10 подсистем и имеет ССН с последовательным соединением элементов. Подсистемы имеют следующие параметры распределения вариаций ВБР

- для $j = 1, \dots, 5$: $MP_j = 0,995$; $\sigma_{pj} = 0,005$;
- для $j = 6, \dots, 8$: $MP_j = 0,993$; $\sigma_{pj} = 0,007$;
- для $j = 9, 10$: $MP_j = 0,990$; $\sigma_{pj} = 0,010$.

Требуется определить параметры распределения ВБР системы.

В соответствии с пп. 3 и 4 распределение ВБР системы является практически нормальным при любых распределениях ВБР элементов. Параметры распределения ВБР системы определим по оперативным зависимостям (12)

$$M_p = 1 - (5 \cdot 0,005 + 3 \cdot 0,007 + 2 \cdot 0,010) = 0,934;$$

$$\sigma_p^2 = 5 \cdot 0,005^2 + 3 \cdot 0,007^2 + 2 \cdot 0,010^2 = 0,00047 \cdot (\sigma_p = 0,022).$$

Если использовать точные зависимости (13), то получим

$$M_p = 0,995^5 \cdot 0,993^3 \cdot 0,99^2 = 0,935;$$

$$\sigma_p^2 = 0,935^2 [5(0,005/0,995)^2 + 3(0,007/0,993)^2 + 2(0,005/0,995)^2] = 0,00042 \cdot (\sigma_p = 0,021).$$

Результаты расчетов показывают, что приближенный метод имеет хорошую точность, которая возрастает при увеличении ВБР элементов.

6. Исследования распределения вариаций ВБР СТС

Показатели распределения вариаций ВБР СТС и их подсистем зависят от параметров распределений вариаций ВБР составляющих элементов, которые в свою очередь зависят от условий производства и эксплуатации (от материалов, производственно-технической базы, технологии изготовления и сборки, квалификации персонала, системы контроля качества, условий эксплуатации и целевого применения и пр.). При исследованиях распределения ВБР СТС уровень качества производства и эксплуатации подсистем на каждом уровне иерархии будем условно характеризовать ожидаемым значением ВБР M_p , а стабильность производства и эксплуатации – СКО распределения ВБР σ_p .

В соответствии с пп. 3–5 распределение ВБР системы является практически нормальным. Исследуем параметры этого распределения в зависимости от суммарного числа элементов нижнего уровня иерархии (см. рис. 1). Будем полагать, что j -е элементы нижнего уровня иерархии имеют различные типы распределений вариаций ВБР с одинаковыми математическими ожиданиями $M_{pj} = \text{const}$ и СКО $\sigma_{pj} = \text{const}$. При этом СКО ВБР элементов будем представлять в виде

$$\sigma_{pj} = b(1 - M_{pj}). \tag{14}$$

Коэффициент b зависит от типа распределения вариаций ВБР. При высокой ВБР элементов значение $b=0,58$ при равномерном распределении и $b \approx 0,99$ при экспоненциальном распределении. Так как распределение ВБР элементов неизвестно, то при исследованиях примем осредненное значение коэффициента b .

Для наглядности результатов расчетов математические ожидания ВБР элементов будем выбирать такими, чтобы математическое ожидание ВБР системы было постоянным: $M_p = \text{const}$. При этом значения M_{pj} будем определять на основе зависимости (1), СКО σ_{pj} по зависимости (14), а СКО вариаций ВБР системы – по зависимости (13).

Плотности вероятности вариаций ВБР системы с МО ВБР $M_p = 0,95$ при разных числах элементов показаны на рис. 4.

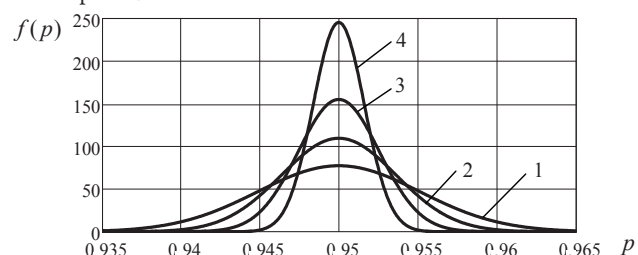


Рис. 4. Плотности вероятности вариаций ВБР системы с разным числом элементов J при $M_p = 0,95$: 1- $J = 50$; 2- $J = 100$; 3- $J = 200$; 4- $J = 500$

Из рис. 4 видно, что с ростом суммарного числа элементов СКО вариаций ВБР системы снижается. Аналогичная картина наблюдается и при других значениях ВБР системы и при разных показателях распределения ВБР элементов нижнего уровня иерархии СТС. Зависимости $\sigma_p(J)$ при некоторых значениях МО ВБР системы M_p показаны на рис. 5.

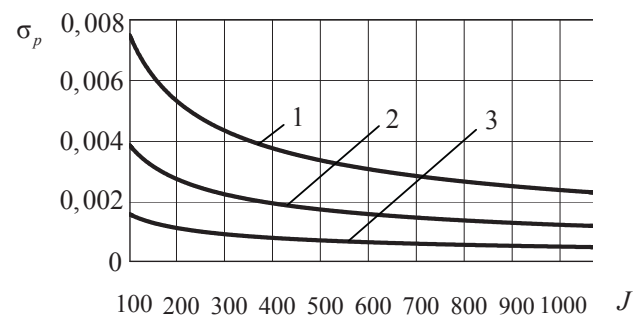


Рис. 5. Зависимости СКО вариаций ВБР системы от числа элементов при $M_p = 0,9$ (1), $M_p = 0,95$ (2) и $M_p = 0,98$ (3)

Значения СКО вариаций ВБР СТС при некоторых значениях ВБР СТС и суммарного числа элементов приведены в табл. 2.

Таблица 2

Среднеквадратические отклонения вариаций ВБР СТС в зависимости от ВБР СТС и суммарного числа элементов нижнего уровня иерархической структуры СТС

МО ВБР СТС M_p	Число элементов J				
	50	100	200	500	1000
0,90	0,0106	0,0075	0,0053	0,0034	0,0024
0,95	0,0054	0,0039	0,0027	0,0017	0,0012
0,98	0,0022	0,0016	0,0011	0,0007	0,0005

Рассмотрим показатели распределения вариаций ВБР подсистем СТС на примере, когда СТС имеет 5 уровней иерархии, как на рис. 1, и на каждом уровне подсистема включает 10 подсистем предыдущего уровня иерархии. Значения показателей распределения ВБР подсистем каждого уровня при ВБР СТС $M_p = 0,95$ приведены в табл. 3.

Таблица 3

Показатели ВБР подсистем СТС при $M_p = 0,95$

Уровни иерархии k	Суммарное число элементов J	МО ВБР подсистем M_p	СКО ВБР подсистем σ_p
5 (СТС)	10000	0,95	0,000385
4	1000	0,995	0,000125
3	100	0,9995	0,0000395
2	10	0,99995	0,0000125

Приведенные результаты показывают, что по мере повышения уровня иерархии ожидаемое значение ВБР подсистем снижается, а СКО ВБР возрастает. При этом компактность распределения ВБР подсистем возрастает, так что плотность вероятности вариаций ВБР СТС приближается к импульсной функции. Уровень производства и эксплуатации элементов на низких уровнях иерархии, который характеризуется ожидаемым значением ВБР подсистем, непосредственно влияет на ожидаемую ВБР СТС. Стабильность производства и эксплуатации, определяющая СКО распределения вариаций ВБР подсистем, оказывает некоторое влияние на СКО ВБР СТС, однако не изменяет характера и компактности самого распределения ВБР. Из табл. 3 видно, что ВБР СТС в рассмотренном примере с доверительной вероятностью 0,95 находится в узких пределах: $P \in [0,9494; 0,9506]$. Качественно такие же результаты получаются и при других вариантах структуры СТС и показателей распределения ВБР СТС и элементов.

Конечно, на каждом уровне иерархии на ВБР подсистем могут влиять не только ВБР элементов 1-го уровня, но и качество изготовления, сборки, отладки и контроля безотказности подсистем на всех уровнях иерархии. Кроме того, в состав сборки любого уровня иерархии могут входить не только элементы предыдущего уровня, но и элементы низших уровней иерархии (соединительные и крепежные детали, монтажные элементы и др.). Состав подсистем может быть разным по качеству и количеству. На каждом уровне иерархии на безотказность подсистем могут влиять условия эксплуатации, различные управляющие и возмущающие факторы. Однако при соблюдении требований нормативно-технической документации это не может существенно

изменить характер распределения ВБР СТС. Главным является вывод, что при установившейся кооперации производства и стабильном качестве производства и эксплуатации ВБР СТС может варьироваться в очень узких пределах. Поэтому результаты статистического оценивания ВБР СТС по ограниченному числу испытаний образцов СТС можно с высокой достоверностью распространять на всю совокупность СТС.

Приведенные результаты, подтверждающие практически неслучайный характер ВБР образцов, входящих в совокупность СТС, справедливы и для других показателей безотказности СТС и их элементов, которые взаимосвязаны с ВБР, в частности, для интенсивности отказов СТС, функционирующих во времени. Кроме того, проведенные исследования показывают, что полученные выше результаты и выводы можно распространить и на СТС с резервированием элементов и подсистем. При этом компактность ВБР СТС еще более возрастает (СКО ВБР снижается).

Полученные результаты и выводы справедливы при штатных условиях производства, эксплуатации и целевого применения СТС. Конечно, на заключительном этапе сборки, контроля, эксплуатации и подготовки к испытаниям или целевому применению отдельных элементов СТС отклонения от нормативной документации могут повлиять на уровень ВБР СТС. Поэтому приведенные результаты исследований не снижают важности задач обеспечения, контроля и поддержания на требуемом уровне показателей безотказности и других характеристик элементов и подсистем СТС.

7. Выводы

На основе проведенных исследований вероятности безотказной работы сложных технических систем получены следующие основные результаты и выводы.

ВБР каждого элемента и подсистемы СТС является случайной величиной и варьируется в зависимости от показателей стабильности производства и эксплуатации.

Вариации ВБР СТС зависят от вариаций ВБР элементов и имеют практически нормальное распределение.

Математическое ожидание и среднее квадратическое отклонение ВБР СТС зависят от состава и структуры СТС и показателей безотказности элементов. При стабильных условиях производства и эксплуатации распределение ВБР СТС имеет компактный характер и приближается к импульсной функции, так что все образцы СТС имеют практически одинаковые показатели безотказности.

Компактный характер распределения вариаций ВБР СТС обеспечивает возможность достоверного оце-

нивания показателей безотказности всей совокупности СТС по результатам испытаний ограниченного числа образцов СТС. Полученные результаты могут использо-

ваться при планировании экспериментальной отработки образцов СТС и контроле безотказности СТС по результатам испытаний.

Литература

1. *Вероятность и математическая статистика: Энциклопедия / под ред. Ю. В. Прохорова. – М.: Большая Российская энциклопедия, 2003. – 912 с.*
2. *Волков Л. И., Лукин В. Л., Сухорученков Б. И. Методы статистического контроля надежности технических систем. – Юбилейный: ЗАО «ПСТМ», 2008. – 332 с.*
3. *Сухорученков Б. И. Анализ малой выборки. Прикладные статистические методы. М.: Вузовская книга, 2010. – 384 с.*

Материал поступил в редакцию 20. 03. 2012 г.