

© Соломонов Ю.С., Сухорученков Б. И.

МЕТОД КОНТРОЛЯ ДИНАМИКИ ВЕРОЯТНОСТИ БЕЗОТКАЗНОЙ РАБОТЫ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ С ПЕРЕМЕННОЙ СТРУКТУРОЙ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ОТРАБОТОЧНЫХ ИСПЫТАНИЙ

Рассматриваются технические системы (ТС) однократного применения, структура которых изменяется в процессе их функционирования. Разрабатывается математическая модель динамики вероятности безотказной работы (ВБР) ТС за время целевого использования в процессе отработочных испытаний (ОИ). Обосновывается статистический метод оценивания параметров модели и динамики ВБР по результатам ОИ. Приводится пример использования разработанных модели и метода.

1. Постановка задачи

Эффективность использования ТС зависит от их безотказности, одним из основных показателей которой является ВБР ТС в течение периода их целевого использования. Высокий уровень ВБР ТС обеспечивается и контролируется при их ОИ. При отработке ТС ВБР в общем случае возрастает благодаря выявлению и устранению дефектов и неисправностей конструктивного, производственного и эксплуатационного характера, которые не были выявлены на предыдущих этапах отработки элементов ТС. Задача контроля динамики ВБР в процессе ОИ имеет повышенную сложность и решается в несколько этапов:

1. Выбирается математическая параметрическая модель изменения ВБР в процессе ОИ с точностью до неизвестных параметров, которая адекватно описывает динамику ВБР.

2. Выбирается статистический метод оценивания неизвестных параметров модели на основе обработки статистических данных.

3. Оцениваются параметры модели динамики ВБР путем обработки результатов ОИ ТС выбранным методом.

4. Оценивается переменная ВБР в классе выбранной модели и конечное значение ВБР ТС на основе оценок параметров модели.

Классические методы контроля ВБР ТС изложены в работе [1]. Для описания процесса изменения ВБР ТС при испытаниях разработаны и используются различные параметрические модели: параболические, экспоненциальные, модели с учетом количества проводимых доработок, выявляемых и устраняемых дефектов [1–3]. Все такие модели основаны на предположении, что ТС в процессе их функционирования имеют устойчивую структуру. В то же время для некоторых ТС их структура изменяется в процессе целевого функционирования. К таким ТС относятся баллистические ракеты (БР) на активном участке полета и ракеты-носители (РН) на участке выведения КА. Имеются также ТС, подсистемы которых в период одного цикла работы функционируют последовательно друг за другом в соответствии с циклограммой работы. Например, системы подготовки и обеспечения старта БР и РН, системы возвращения КА и их элементов с орбиты и др. Особенностью испытаний таких систем является то, что при отказе одной из подсистем последующие подсистемы даже не включаются в работу и информация о показателях их надежности отсутствует. Существующие модели динамики ВБР не адекватны процессу изменения ВБР таких систем в процессе отработки. Поэтому возникает задача разработки моделей динамики ВБР в процессе отработки ТС с переменной структурой.

Если параметрическая модель ВБР выбрана, то ее параметры можно оценить по результатам ОИ различными статистическими методами. Наиболее часто используются метод наименьших квадратов (МНК) и метод максимального правдоподобия (ММП). Кроме того, можно использовать метод несмещенных оценок (МНО), обоснованный в работе [4]. Эти методы также не учитывают переменную структуру ТС, что снижает

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 ВВСН имени Петра Великого.

их точность. Например, при оценивании ВБР РН случайный отказ учитывается одинаково, независимо от того, произошел он при запуске, когда другие системы еще не работали, или в конце при отделении КА, когда практически все системы отработали успешно, хотя по информативности о надежности РН эти случаи совершенно разные. Поэтому возникает задача коррекции статистических методов для оценивания динамики ВБР ТС с переменной структурой.

Решение отмеченных задач и обоснование метода контроля динамики ВБР ТС с переменной структурой в процессе отработочных испытаний излагается далее.

2. Модель динамики ВБР ТС с переменной структурой в процессе отработочных испытаний

Сравнительный анализ точности различных моделей динамики ВБР ТС с постоянной структурой в процессе ОИ показал [2], что хорошей точностью обладает модель с учетом выявляемых и устраняемых дефектов, обоснование которой приведено в работе [3]. Принцип формирования этой модели можно использовать для построения модели динамики ВБР ТС с переменной структурой. Рассмотрим ТС, состоящую из j -х подсистем, $j = 1, \dots, J$, которые функционируют последовательно друг за другом. При функционировании каждой подсистемы предыдущие подсистемы или исключаются из состава ТС, или отключаются. Структурная схема надежности такой ТС показана на рис. 1. При этом предполагается, что в составе ТС имеется подсистема (с номером J), которая функционирует на протяжении всего периода работы ТС, например, система управления ТС.

Обозначим ВБР каждой подсистемы в течение ее

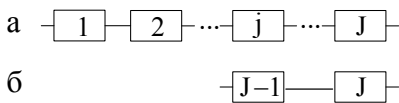


Рис. 1. Структурная схема надежности ТС:
 а – в начале функционирования;
 б – в конце функционирования

периода работы в виде $P_j, j = 1, \dots, J$. При этом ВБР ТС P можно представить в виде зависимости от P_j

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

При отработке ТС ВБР подсистем в общем случае изменяются (возрастают) благодаря выявлению и устранению дефектов, которые не были выявлены на предыдущих этапах отработки подсистем. Анализ результатов ОИ

БР и РН показал, что за период отработочных испытаний может быть выявлено до 5 – 10 различного рода существенных дефектов, которые приводят к отказу БР или РН. При этом многие дефекты проявляются не сразу, а через 1 – 20 испытаний, что свидетельствует о том, что дефекты имеют случайную природу проявления их при испытаниях. Это свойство положено в основу модели динамики ВБР ТС в процессе ОИ, которая обосновывается далее.

Рассмотрим цикл последовательных i -х отработочных испытаний ТС, $i = 1, \dots, n$. При обосновании модели динамики ВБР ТС примем следующие допущения.

1. До начала испытаний (до $i = 1$) каждая подсистема может иметь до Q_j дефектов, $j = 1, \dots, J$. Каждый j, q -й дефект j -й подсистемы, $q = 1, \dots, Q_j$, проявляется при испытании с вероятностью $1 - G_{j,q}$, а с вероятностью $G_{j,q}$ соответствующая подсистема может нормально работать даже при наличии этого дефекта.

2. Дефекты проявляются при испытаниях независимо друг от друга и приводят к отказу подсистемы и ТС в целом. Вероятность проявления сразу нескольких дефектов близка к нулю.

3. После проявления дефекта проводятся доработки для его устранения. Однако некоторые дефекты могут проявиться повторно из-за неэффективности доработок. Такие дефекты будем учитывать как самостоятельные наряду с остальными, только начало внесения дефекта будем совмещать с номером испытания, при котором был выявлен и после которого был устранен первоначальный дефект. Факт наличия повторного дефекта устанавливается только при его проявлении.

4. После доработок дефект (основной или повторный) устраняется полностью (вероятность $G_{j,q}$ становится равной 1).

5. После окончания ОИ могут остаться отдельные невыявленные дефекты с показателями их непроявления $G_{j,r} = 0, 1, \dots, R_j, j = 1, \dots, J$. При $R_j = 0$ показатель $G_{j,0} = 1$.

6. После выявления и устранения всех дефектов ВБР подсистем и ТС в целом достигают предельных значений $P_{jk}, j = 1, \dots, J$, и P_k соответственно.

7. Если при отказе j -й подсистемы дефекты не выявлены и доработки не проведены, то отказ признается случайным (из-за ограниченной ВБР подсистемы P_{jk}). На основе приведенных допущений изменение ВБР j -й подсистемы в процессе i -х испытаний можно представить в виде следующей модели:

$$P_{j,i} = P_{jk} \left[\prod_{q=1}^{Q_{j,i}} G_{j,q}(i) \right] \prod_{r=0}^{R_j} G_{j,r} , \tag{2}$$

$$j = 1, \dots, J, \quad i = 1, \dots, n,$$

где $G_{j,q}(i)$ – функция вероятности неоявления j,q -го дефекта, показанная на рис. 2:

$$G_{j,q}(i) = \begin{cases} G_{j,q} & \text{при } i \in [i_{j,qn}; i_{j,qk}]; \\ 1 & \text{при } i \notin [i_{j,qn}; i_{j,qk}], \end{cases} \quad (3)$$

где $i_{j,qn}; i_{j,qk}$ – номер испытаний, перед которым был внесен дефект и после которого он был выявлен и устранен соответственно;

$Q_{j\theta}$ – число выявленных дефектов, считая и повторные).

На основе моделей (2) с учетом (3) и (1) можно построить модель динамики ВБР ТС в процессе i -х отработочных испытаний. Для этого все возможные невыявленные дефекты сведем в одну группу, независимо от их принадлежности к подсистемам, и перенумеруем их

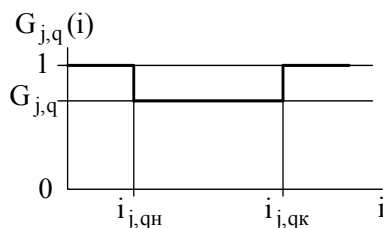


Рис. 2. Функция вероятности неоявления j, q -го дефекта

вероятности к виду $G_r, r = 0, 1, \dots, R$. В результате получим следующую модель динамики ВБР ТС:

$$P_i = \left(\prod_{j=1}^J P_{jk} \right) \left[\prod_{j=1}^J \prod_{q=1}^{Q_{j\theta}} G_{j,q}(i) \right] \prod_{r=0}^R G_r. \quad (4)$$

В соответствии с моделью (4) ВБР ТС изменяется скачкообразно после испытаний, при которых были выявлены дефекты и после которых проведены доработки для их устранения. Модель (4) описывает случайную последовательность роста ВБР, зависящую от случайных параметров. Для каждой конкретной ТС изменение ВБР при ее отработке соответствует одной из возможных реализаций случайной последовательности. Такие реализации можно получить на основе статистического моделирования. В качестве примера рассмотрим эталонный образец ТС с постоянной структурой с показателями:

$P_k = 0,97; Q = 3; G_1 = 0,5; G_2 = 0,75; G_3 = 0,85; G_4 = 0,9$ (повторный дефект после второго).

Некоторые реализации ВБР P_{ism} при $n = 20$, полученные при статистическом моделировании процесса отработки эталонного образца ТС, показаны на рис. 3.

Для наглядности значения ВБР при дискретных номерах ОИ на рис. 3 соединены прямыми линиями. Из

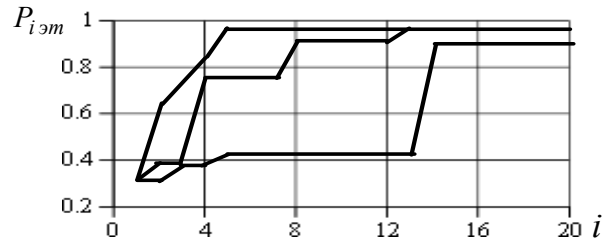


Рис. 3. Динамика реализаций ВБР эталонного образца ТС при отработочных испытаниях

рисунка следует, что реализации ВБР ТС при отработочных испытаниях могут иметь значительные вариации. Это существенно усложняет задачу оценивания динамики ВБР ТС при отработке.

3. Построение плотности распределения оценок параметров модели (4) по результатам испытаний

Параметры модели динамики ВБР ТС (4) неизвестны. Эти параметры можно оценить по результатам ОИ по методу несмещенных оценок (МНО) [4]. В соответствии с МНО сначала строится плотность распределения оценок неизвестных параметров. Для этого рассмотрим вероятности возможных исходов испытаний $x_i, i = 1, \dots, n$, с учетом модели (4) при известных параметрах модели:

1. Успешное испытание ($x_i = 1$). Вероятность этого определяется по зависимости (4):

$$Вер(x_i = 1) = \left(\prod_{j=1}^J P_{jk} \right) \left[\prod_{j=1}^J \prod_{q=1}^{Q_{j\theta}} G_{j,q}(i) \right] \prod_{r=0}^R G_r. \quad (5)$$

2. Отказ ТС из-за j, q -го дефекта j -й подсистемы ($x_i = 0_{j,q}$). Вероятность такого отказа определяется с учетом того, что все предыдущие подсистемы проработали нормально:

$$Вер(x_i = 0_{j,q}) = \left(\prod_{j=1}^{j-1} P_{jk} \right) \left[\prod_{j=1}^{j-1} \prod_{q=1}^{Q_{j\theta}} G_{j,q}(i) \right] \times \\ \times P_{jk} (1 - G_{j,q}) \left[\prod_{q \in \Omega_{j,q}} G_{j,q}(i) \right] \prod_{r=0}^R G_r, \quad (6)$$

где $\Omega_{j,q}$ – множество номеров дефектов j -й подсистемы, кроме рассматриваемого j, q -го дефекта.

3. Случайный отказ ТС из-за случайного отказа j -й подсистемы ($x_i = 0_{j,ca}$). Вероятность такого отказа определяется с учетом того, что все предыдущие подсистемы проработали безотказно:

$$\begin{aligned}
 \text{Вер}(x_i=0_{jcn}) &= \left(\prod_{j=1}^{j-1} P_{jk} \right) \left[\prod_{j=1}^{j-1} \prod_{q=1}^{Q_{j6}} G_{j,q}(i) \right] \times \\
 &\times (1 - P_{jk}) \left[\prod_{q=1}^{Q_{j6}} G_{j,q}(i) \right] \prod_{r=0}^R G_r. \quad (7)
 \end{aligned}$$

Рассмотрим совокупность возможных последовательных результатов испытаний ТС:

$$\begin{aligned}
 \{x_i\}; x_i \in [1; 0_{jq}; 0_{jcn}], \quad (8) \\
 q = 1, \dots, Q_j; j = 1, \dots, J; i = 1, \dots, n.
 \end{aligned}$$

Априорная вероятность получения совокупности $\{x_i\}$ равна произведению вероятностей $\text{Вер}(x_i)$, определяемых по зависимостям (5) – (7) с учетом предполагаемого значения x_i :

$$\text{Вер}(\{x_i\}) = \prod_{i=1}^n \text{Вер}(x_i). \quad (9)$$

После преобразований вероятности (9) с учетом предполагаемой последовательности исходов испытаний $\{x_i\}$ и вероятностей (5) – (7) получается следующая зависимость для априорной вероятности $\text{Вер}(\{x_i\})$ при известных параметрах модели (4):

$$\begin{aligned}
 \text{Вер}(\{x_i\}) &= \left[\prod_{j=1}^J P_{jk}^{n_j - m_j} (1 - P_{jk})^{m_j} \right] \times \\
 &\times \left[\prod_{j=1}^J \prod_{q=1}^{Q_{j6}} G_{j,q}^{n_{j,q} - 1} (1 - G_{j,q}) \right] \prod_{i=1}^n \prod_{r=0}^R G_r, \quad (10)
 \end{aligned}$$

где n_j, m_j – число испытаний, при которых включалась в работу j -я подсистема, и число случайных отказов подсистемы;

$n_{j,q}$ – число испытаний, при которых работала j -я подсистема с j, q -м дефектом.

Важнейшим показателем безотказности ТС при отработочных испытаниях ТС является конечное значение ВБР. Для его оценивания необходимо выразить зависимость вероятности (10) от ВБР ТС P_k , которая достигается при выявлении и устранении всех дефектов. Значение ВБР ТС зависит от ВБР подсистем. При создании ТС обычно обеспечивается примерно одинаковая безотказность подсистем, то есть $P_{jk} \approx \text{const}$. При этом ВБР ТС и подсистем связаны следующими соотношениями:

$$P_k \approx P_{jk}^J; \quad P_{jk} \approx P_k^{1/J}. \quad (11)$$

Допустим, что эти соотношения являются строгими. В этом случае первый сомножитель в зависимости (10) можно представить в виде:

$$S = P_k \sum_{j=1}^{J-1} (n_j - m_j) \left(1 - P_k^{1/J} \right) \sum_{j=1}^J m_j. \quad (12)$$

Для современных ТС значение ВБР $P_k > 0,95$. При этом величина $P_k^{1/J} \rightarrow 1$ и ее можно определить на основе метода линеаризации по зависимости

$$P_k^{1/J} = 1 + \left(\frac{\partial P_k^{1/J}}{\partial P_k} \right) (P_k - 1) = 1 + \frac{1}{J} P_k^{1/J-1} (1 - P_k). \quad (13)$$

На основе (13) сомножитель (12) S можно преобразовать к виду:

$$S = P_k^{n_{\text{экв}} - m} (1 - P_k)^m, \quad (14)$$

где $n_{\text{экв}}$ и m – эквивалентное число испытаний ТС и суммарное число случайных отказов:

$$n_{\text{экв}} = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J n_j; \quad m = \sum_{j=1}^J m_j. \quad (15)$$

Априорную вероятность (10) возможных исходов испытаний на основе (14) с учетом (15) можно выразить в виде функции от конечной ВБР ТС:

$$\begin{aligned}
 \text{Вер}(\{x_i\}) &= \frac{1}{J} P_k^{n_{\text{экв}} - m} (1 - P_k)^m \times \\
 &\times \left[\prod_{j=1}^J \prod_{q=1}^{Q_{j6}} G_{j,q}^{n_{j,q} - 1} (1 - G_{j,q}) \right] \prod_{i=1}^n \prod_{r=0}^R G_r. \quad (16)
 \end{aligned}$$

Параметры модели динамики ВБР (4) неизвестны. Их можно оценить по результатам испытаний. Обозначим возможные оценки параметров модели $P_k, G_{j,q}$ и G_r в виде $p_k, g_{j,q}$ и g_r соответственно, $q = 1, \dots, Q_j; j = 1, \dots, J; r = 1, \dots, R$. При $R = 0$ показатель $G_0 = 1$ и его оценка $g_0 = 1$. В соответствии с МНО [4] плотность распределения оценок параметров пропорциональна вероятности (16) при подстановке в нее полученных результатов испытаний и замене параметров на их возможные оценки:

$$\begin{aligned}
 f(p_k, \{g_{j,q}\}, \{g_r\}) &= k p_k^{n_{\text{экв}} - m} (1 - p_k)^m \times \\
 &\times \left[\prod_{j=1}^J \prod_{q=1}^{Q_{j6}} g_{j,q}^{n_{j,q} - 1} (1 - g_{j,q}) \right] \prod_{i=1}^n \prod_{r=0}^R g_r, \quad (17)
 \end{aligned}$$

где k – нормирующий сомножитель, определяемый из условия, чтобы интеграл от плотности по множеству возможных оценок параметров был равен единице.

Анализ плотности распределения (17) показывает, что она соответствует взаимно независимым оценкам параметров. Поэтому на основе этой плотности можно построить автономные плотности распределения оценок отдельных параметров, которые имеют вид

$$f(p_k) = k_p p_k^{n_{\text{экв}} - m} (1 - p_k)^m; \quad (18)$$

$$f(g_{j,q}) = k_{j,q} g_{j,q}^{n_{j,q}-1} (1-g_{j,q}), \quad (19)$$

$$q = 1, \dots, Q_j, \quad j = 1, \dots, J;$$

$$f(g_r) = k_r g_r^n, \quad r = 1, \dots, R, \quad (20)$$

где нормирующие сомножители $k_p, k_{j,q}$ и k_r определяются из условий

$$\int_0^1 f(p_\kappa) dp_\kappa = 1; \quad \int_0^1 f(g_{j,q}) dg_{j,q} = 1; \\ \int_0^1 f(g_r) dg_r = 1. \quad (21)$$

После преобразований плотностей (18) – (20) с учетом (21) получаются конечные зависимости для плотностей распределения оценок неизвестных параметров модели динамики ВБР ТС, которые соответствуют бета-распределению

$$f(p_\kappa) = \frac{\Gamma(n_{экр} + 2)}{\Gamma(n_{экр} + 1 - m)\Gamma(m + 1)} p_\kappa^{n_{экр} - m} (1 - p_\kappa)^m; \quad (22)$$

$$f(g_{j,q}) = n_{j,q} (n_{j,q} + 1) g_{j,q}^{n_{j,q}-1} (1 - g_{j,q}), \quad (23)$$

$$q = 1, \dots, Q_j, \quad j = 1, \dots, J;$$

$$f(g_r) = (n + 1) g_r^n, \quad r = 1, \dots, R, \quad (24)$$

где $\Gamma(\cdot)$ – гамма-функция.

На основе (22) получаются следующие выражения для плотностей распределения оценок предельной ВБР ТС при малом числе случайных отказов:

при $m = 0$: $f(p_\kappa) = (n_{экр} + 1) p_\kappa^{n_{экр}}$; (25)

при $m = 1$: $f(p_\kappa) = n_{экр} (n_{экр} + 1) p_\kappa^{n_{экр}-1} (1 - p_\kappa)$; (26)

при $m = 2$: $f(p_\kappa) = 0,5 n_{экр} (n_{экр}^2 - 1) p_\kappa^{n_{экр}-2} (1 - p_\kappa)^2$; (27)

при $m = 3$: $f(p_\kappa) = \frac{1}{6} n_{экр} (n_{экр} - 2) (n_{экр}^2 - 1) p_\kappa^{n_{экр}-3} (1 - p_\kappa)^3$. (28)

Виды плотностей распределения оценок при $n_{экр} = 10, n_{j,q} = 10, n = 10$ и вариациях числа случайных отказов m показаны на рис. 4. На рисунке также показаны значения плотностей распределения оценок в дискрет-

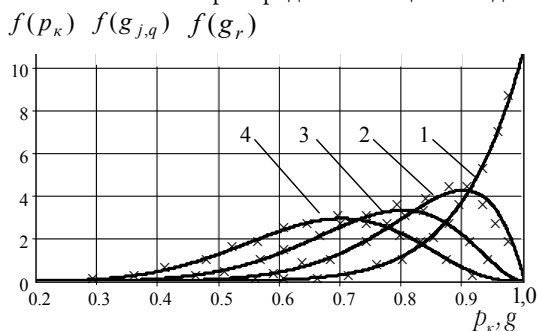


Рис. 4. Плотности распределения оценок ВБР и показателей дефектов при $n = n_{экр} = n_{j,q} = 10$:

1 – $f(p_\kappa)$ при $m = 0$ и $f(g_{j,q})$; 2 – $f(p_\kappa)$ при $m = 1$ и $f(g_{j,q})$;
3 – $f(p_\kappa)$ при $m = 2$; 4 – $f(p_\kappa)$ при $m = 3$;
××× – по результатам статистического моделирования

ных точках, полученные по результатам статистического моделирования, которые подтверждают справедливость зависимостей (23) – (28), полученных теоретически. Видно, что плотности распределения оценок неизвестных параметров имеют несимметричный вид.

4. Распределение числа возможных невыявленных дефектов

Оценка ВБР ТС зависит от числа возможных невыявленных дефектов. В [3] были получены вероятности числа невыявленных дефектов в зависимости от числа испытаний, приведенные в табл. 1.

Таблица 1

Вероятности числа невыявленных дефектов Вер(R) после n испытаний

Число испыт. n	Число невыявленных дефектов R						M[R]	
	0	1	2	3	4	5		6
10	0,58	0,25	0,10	0,04	0,02	0,01	0	0,69
20	0,61	0,24	0,10	0,04	0,01	0	0	0,64
30	0,62	0,24	0,09	0,04	0,01	0	0	0,61
Осреднен. значения	0,60	0,25	0,10	0,04	0,01	0	0	0,65
б	0,60	0,85	0,95	0,99	1	1	1	-

В таблице также приведены значения математического ожидания числа невыявленных дефектов $M[R]$ и вероятности $\alpha = \text{Вер}(R \leq \mathbf{R})$ того, что число невыявленных дефектов не превысит заданного значения \mathbf{R} . Из табл. 1 видно, что вероятности $\text{Вер}(R)$ слабо зависят от числа испытаний. Поэтому при оценивании ВБР ТС по серии отработочных испытаний можно использовать осредненные значения вероятностей, приведенные в табл. 1. Из приведенных данных следует, что после отработки ТС могут быть выявлены все возможные дефекты, но может остаться до трех невыявленных дефектов с вероятностью 0,99.

5. Точечное оценивание параметров модели динамики ВБР

В соответствии с МНО на основе плотностей распределения оценок (22) – (24) можно определить несмещенные эффективные точечные оценки параметров модели динамики ВБР ТС по результатам отработочных испытаний и их дисперсии как первые и вторые центральные моменты распределений. Точечная оценка

конечной ВБР P_κ и ее дисперсия вычисляются по зависимостям

$$\left. \begin{aligned} \bar{P}_\kappa &= \int_0^1 p_\kappa f(p_\kappa) dp_\kappa; \\ \sigma_{\bar{P}_\kappa}^2 &= \int_0^1 (p_\kappa - \bar{P}_\kappa)^2 f(p_\kappa) dp_\kappa. \end{aligned} \right\} (29)$$

Оценки показателей дефектов $G_{j,q}$ и G_r определяются аналогично. После преобразований с учетом плотностей (22) – (28) получаются следующие зависимости для вычисления точечных оценок параметров модели (4) и их дисперсий:

$$\left. \begin{aligned} \bar{P}_\kappa &= \frac{n_{\text{экв}} + 1 - m}{n_{\text{экв}} + 2}; \\ \sigma_{\bar{P}_\kappa}^2 &= \frac{(m + 1)(n_{\text{экв}} + 1 - m)}{(n_{\text{экв}} + 2)^2 (n_{\text{экв}} + 3)}; \end{aligned} \right\} (30)$$

$$\bar{G}_{j,q} = \frac{n_{j,q}}{n_{j,q} + 2}; \quad \sigma_{\bar{G}_{j,q}}^2 = \frac{2 n_{j,q}}{(n_{j,q} + 2)^2 (n_{j,q} + 3)}; (31)$$

$$q = 1, \dots, Q; \quad j = 1, \dots, J;$$

$$\bar{G}_r = \frac{n + 1}{n + 2}; \quad \sigma_{\bar{G}_r}^2 = \frac{n + 1}{(n + 2)^2 (n + 3)}, (32)$$

$$r = 1, \dots, R.$$

Из зависимостей (30) – (32) следует, что при возрастании числа испытаний оценки параметров модели динамики ВБР (4) и их точность возрастают.

6. Точечное оценивание динамики ВБР

На основе точечных оценок (30)–(32) параметров модели (4) с учетом равенства оценок показателей дефектов можно определить оценки переменной ВБР ТС в процессе отработочных испытаний по модели (4) с учетом (1) и их дисперсии по методу линеаризации:

$$\bar{P}_i = \bar{P}_\kappa \left[\prod_{j=1}^J \prod_{q=1}^{Q_j} \bar{G}_{j,q}(i) \right] \bar{G}_r^R; (33)$$

$$\sigma_{\bar{P}_i}^2 = \frac{\sigma_{\bar{P}_\kappa}^2}{\bar{P}_\kappa^2} + \sum_{j=1}^J \sum_{q=1}^{Q_j} \frac{\sigma_{\bar{G}_{j,q}}^2}{\bar{G}_{j,q}^2(i)} + R \frac{\sigma_{\bar{G}_r}^2}{\bar{G}_r^2}; (34)$$

$$q = 1, \dots, Q_j; \quad j = 1, \dots, J; \quad i = 1, \dots, n,$$

где $\bar{G}_{j,q}(i), \sigma_{\bar{G}_{j,q}}^2(i)$ – функции оценок вероятностей не-

проявления дефектов и их дисперсии, определяемые с учетом зависимостей (3):

$$\left. \begin{aligned} \text{при } i \in [i_{j,qn}; i_{j,q\kappa}]: \\ \bar{G}_{j,q}(i) = \bar{G}_{j,q}, \quad \sigma_{\bar{G}_{j,q}}^2(i) = \sigma_{\bar{G}_{j,q}}^2; \\ \text{при } i \notin [i_{j,qn}; i_{j,q\kappa}]: \\ \bar{G}_{j,q}(i) = 1, \quad \sigma_{\bar{G}_{j,q}}^2(i) = 0. \end{aligned} \right\} (35)$$

По формулам (33) и (34) можно получить различные оценки ВБР ТС в зависимости от предполагаемого числа невыявленных дефектов R и вероятности (уровня гарантии) α (табл. 1):

оптимистические – при $R = 0$ с вероятностью $\alpha = 0,6$; гарантированные:

при $R = 1$ с вероятностью $\alpha = 0,85$;

при $R = 2$ с вероятностью $\alpha = 0,95$;

при $R = 3$ с вероятностью $\alpha = 0,99$;

пессимистические – при $R = 4$ с вероятностью $\alpha \approx 1$.

Выбор вероятности (уровня гарантии) α и возможного числа невыявленных дефектов R производится с участием ЛПР (лица, принимающего решение).

7. Точечное оценивание достигнутого уровня ВБР ТС

Наиболее важным показателем надежности ТС является значение ВБР в конце ОИ. Точечную оценку достигнутого уровня ВБР и ее дисперсию можно оперативно определить по зависимостям (33) и (34) при $i = n$:

$$\bar{P}_n = \bar{P}_\kappa \bar{G}_r^R; \quad \sigma_{\bar{P}_n}^2 = \frac{\sigma_{\bar{P}_\kappa}^2}{\bar{P}_\kappa^2} + R \frac{\sigma_{\bar{G}_r}^2}{\bar{G}_r^2}. (36)$$

При отсутствии невыявленных дефектов (при $R = 0$) оценки (36) совпадают с оценками конечной ВБР (30).

Более точные оценки ВБР при $R \geq 1$ определяются на основе плотности распределения оценок параметров по зависимостям:

$$\bar{P}_n = \int_{0_1}^1 \dots \int_0^1 p_n f(p_n, \{g_r\}) dp_n dg_1 \dots dg_R; (37)$$

$$\sigma_{\bar{P}_n}^2 = \int_0^1 \dots \int_0^1 (p_n - \bar{P}_n)^2 f(p_n, \{g_r\}) dp_n dg_1 \dots dg_R, (38)$$

где p_n – возможная оценка достигнутой ВБР;

$$p_n = p_\kappa \prod_{r=0}^R g_r;$$

$f(p_n, \{g_r\})$ – плотность распределения оценок параметров

модели динамики ВБР (4), определяемая на основе плотностей (22) – (28): $f(p_k, \{g_r\}) = f(p_k) \cdot f(g_1) \dots f(g_r)$.

В зависимости от выбранной вероятности α можно предположить различное число невыявленных дефектов и по зависимостям (36) – (38) определить соответствующие оптимистические, гарантированные или пессимистические оценки достигнутого уровня ВБР ТС.

8. Интервальное оценивание достигнутого уровня ВБР ТС

Для интервального оценивания достигнутой ВБР ТС P_n (при $i \neq n$) необходимо построить плотность распределения оценок ВБР, которые обозначим в виде p_n . Такая плотность зависит от предполагаемого (принятого ЛПР) числа невыявленных дефектов R .

8.1. Интервальное оценивание ВБР при отсутствии невыявленных дефектов

При определении оптимистических оценок достигнутой ВБР (при предположении об отсутствии невыявленных дефектов: $R = 0$) плотность распределения оценок ВБР $f(p_n)$ совпадает с плотностью оценок $f(p_k)$ параметра модели (4) P_k , определяемой по зависимостям (22), (25) – (28). При этом оценка нижней доверительной границы P_{nn} для достигнутой ВБР при заданной доверительной вероятности γ определяется из соотношения

$$\int_0^{\bar{P}_m} f(p_k) dp_k = \frac{\Gamma(n_{эКБ} + 2)}{\Gamma(n_{эКБ} + 1 - m) \Gamma(m + 1)} \times \int_0^{\bar{P}_m} p_k^{n_{эКБ} - m} (1 - p_k)^m dp_k = 1 - \gamma. \quad (39)$$

На основе этой общей зависимости после преобразований с учетом плотностей распределения оценок ВБР (25) – (28) получаются следующие соотношения для нахождения оценок нижней доверительной границы для ВБР при некоторых значениях числа случайных отказов:

при $m = 0$:

$$\bar{P}_{nn} = (1 - \gamma)^{\frac{1}{n_{эКБ} + 1}}; \quad (40)$$

при $m = 1$:

$$(n_{эКБ} + 1) \bar{P}_{nn}^{n_{эКБ}} \left(1 - \frac{n_{эКБ}}{n_{эКБ} + 1} \bar{P}_{nn} \right) = 1 - \gamma; \quad (41)$$

при $m = 2$:

$$0,5 \cdot n_{эКБ} (n_{эКБ} + 1) \bar{P}_{nn}^{n_{эКБ} - 1} \times \left[1 - \frac{2(n_{эКБ} - 1)}{n_{эКБ}} \bar{P}_{nn} + \frac{n_{эКБ} - 1}{n_{эКБ} + 1} \bar{P}_{nn}^2 \right] = 1 - \gamma. \quad (42)$$

Оценки нижней доверительной границы для ВБР определяются из соотношений (39), (41), (42) численными методами.

8.2. Интервальное оценивание ВБР при наличии невыявленных дефектов

При определении гарантированных оценок достигнутой ВБР, когда предполагается, что после испытаний может остаться R невыявленных дефектов, плотность распределения оценок ВБР $f(p_n)$ можно определить на основе плотностей распределения (22) и (24) оценок параметров модели ВБР (4). Для этого можно использовать следующий способ, реализуемый на ЭВМ.

Разобьем диапазоны $[0;1]$ возможных значений оценок параметров p_k и g_r , $r = 1, \dots, R$, на малые отрезки одинаковой длины δ . Для центров многомерного малого «куба» с координатами p_{μ} , $\mu = 1, \dots, M$ и g_{r, h_r} , $h_r = 1, \dots, H$, вычислим возможные оценки достигнутой ВБР по зависимости, аналогичной (36), и вероятности B_{μ, h_1, \dots, h_R} попадания оценок p_k и g_r в малый «куб» с «объемом» $v = \delta^{R+1}$

$$P_{n, \mu, h_1, \dots, h_R} = P_{k\mu} \prod_{r=1}^R g_{r, h_r}; \quad (43)$$

$$B_{\mu, h_1, \dots, h_R} = f(p_k) f(g_{1, h_1}) \dots f(g_{R, h_R}) \delta^{R+1}; \quad (44)$$

$$\mu = 1, \dots, M, \quad h_r = 1, \dots, H.$$

Для определения плотности распределения оценок достигнутой ВБР p_n разделим диапазон $[0;1]$ возможных значений ВБР на малые отрезки длины Δ с центрами p_{nv} , $v = 1, \dots, N$. Возьмем частный отрезок $\Delta_v = [p_{nv} \pm 0,5\Delta]$. Из совокупности оценок (43) выберем все оценки $p_{n, \mu, h_1, \dots, h_R}$, которые попадают на отрезок Δ_v . На основе множества (44) найдем все вероятности B_{μ, h_1, \dots, h_R} , соответствующие найденным оценкам $p_{n, \mu, h_1, \dots, h_R}$, и перенумеруем их к виду B_{vz} , $z = 1, \dots, Z$. Определим вероятности попадания оценок ВБР p_n на отрезок Δ_v :

$$\text{Вер} (p_{nv}) = \sum_{z=1}^Z B_{vz}, \quad v = 1, \dots, N. \quad (45)$$

Повторяя вычисления, найдем вероятности попадания оценок ВБР p_n на все отрезки Δ_v , $v = 1, \dots, N$. На основе этих вероятностей определяются плотности рас-

пределения оценок p_n в дискретных точках p_{nv} , соответствующих серединам отрезков Δ_v

$$f(p_{nv}) = \text{Вер}(p_{nv})/\Delta, \quad v = 1, \dots, N. \quad (46)$$

Непрерывная плотность распределения оценок достигнутой ВБР $f(p_n)$ восстанавливается по значениям (46) в дискретных точках методами численной интерполяции и экстраполяции. Оценка нижней доверительной границы P_{nn} для достигнутой ВБР при заданной доверительной вероятности γ вычисляется на основе соотношения

$$\int_0^{\bar{P}_{nn}} f(p_n) dp_n = 1 - \gamma. \quad (47)$$

Оценка \bar{P}_{nn} на основе зависимости (47) определяется численным способом.

9. Демонстрация метода 9.1. Результаты испытаний

Рассмотрим отработочные испытания ТС однократного применения типа БР, которая имеет 10 подсистем, работающих последовательно друг за другом. Последняя 10-я подсистема выполняет роль системы управления и функционирует в течение всего периода. Переменная структурная схема надежности ТС соответствует рис. 1. При проведении $n = 15$ испытаний ТС получены следующие результаты:

- зафиксирован один отказ 2-й подсистемы в 5-м испытании; причины отказа не установлены, доработки не проводились, поэтому отказ признан случайным;
- произошли отказы ТС, обусловленные отказами подсистем из-за дефектов: 3-й подсистемы при 2-м и 7-м испытаниях; 5-й подсистемы в 9-м испытании; 8-й подсистемы в 4-м испытании. Дефекты были выявлены и проведены соответствующие доработки. Однако дефект 3-й подсистемы проявился повторно. Последовательность результатов испытаний с учетом обозначений, принятых в п. 3, представим в виде

$$\{x_i\} = \{1; 0_{3,1}; 1; 0_{8,1}; 0_{2,cr}; 1; 0_{3,2}; 1; 0_{5,1}; 1; 1; 1; 1; 1; 1\}. \quad (48)$$

Необходимо оценить динамику и достигнутый уровень ВБР ТС по модели (4) (определить точечные и интервальные оценки ВБР при доверительной вероятности $\gamma = 0,9$).

Результаты испытаний $x_i, i = 1, \dots, 15$, номера и результаты работы подсистем, которые функционировали

в каждом испытании, приведены в табл. 2. Обозначения в табл. 2 соответствуют обозначениям в п.3.

На основе данных табл. 2 по зависимостям (15) найдем эквивалентное число испытаний и число случайных отказов:

$$n_{экв} = \frac{1}{10} \sum_{j=1}^{10} n_j = 12,7; \quad m = \sum_{j=1}^{10} m_j = 1. \quad (49)$$

Таблица 2

Результаты испытаний ТС

Номер испыт. i	Номера подсистем j									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	0 _{3,1}	-	-	-	-	-	-	1
3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
4	1	1	1	1	1	1	1	0 _{8,1}	-	1
5	1	0 _{2,cr}	-	-	-	-	-	-	-	1
6	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
7	1	1	0 _{3,2}	-	-	-	-	-	-	1
8	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
9	1	1	1	1	0 _{5,1}	-	-	-	-	1
10 - 15	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
n_i	15	15	14	12	12	11	11	11	11	15
m_i	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Q_i	0	0	2	0	1	0	0	1	0	0
$n_{j,1}$	-	-	2	-	6	-	-	3	-	-
$n_{j,2}$	-	-	4	-	-	-	-	-	-	-

9.2. Точечное оценивание параметров модели динамики ВБР

На основе полученных результатов испытаний, приведенных в табл. 2, найдем реализации точечных оценок параметров модели динамики ВБР, их дисперсии и среднеквадратические отклонения (СКО) по зависимостям (30) – (32)

$$\hat{P}_k = \frac{12,7 + 1 - 1}{12,7 + 2} = 0,864; \quad (50)$$

$$\sigma_{\hat{P}_k}^2 = \frac{(1+1)(12,7+1-1)}{(12,7+2)^2(12,7+3)} = 0,00749; \quad (51)$$

$$\sigma_{\bar{P}_k} = 0,0865; \quad (51)$$

$$\left. \begin{aligned} \hat{G}_{3,1} &= \frac{2}{2+2} = 0,500; \\ \sigma_{\hat{G}_{3,1}}^2 &= \frac{2 \cdot 2}{(2+2)^2(2+3)} = 0,0500; \\ \sigma_{\bar{G}_{3,1}} &= 0,224; \end{aligned} \right\} \quad (52)$$

$$\left. \begin{aligned} \hat{G}_{3,2} &= \frac{4}{4+2} = 0,667 ; \\ \sigma_{\hat{G}_{3,2}}^2 &= \frac{4 \cdot 2}{(4+2)^2 (4+3)} = 0,0317 ; \\ \sigma_{\bar{G}_{3,2}} &= 0,178 ; \end{aligned} \right\} \quad (53)$$

$$\left. \begin{aligned} \hat{G}_{5,1} &= \frac{6}{6+2} = 0,750 ; \\ \sigma_{\hat{G}_{5,1}}^2 &= \frac{6 \cdot 2}{(6+2)^2 (6+3)} = 0,0208 ; \\ \sigma_{\bar{G}_{5,1}} &= 0,144 ; \end{aligned} \right\} \quad (54)$$

$$\left. \begin{aligned} \hat{G}_{8,1} &= \frac{3}{3+2} = 0,600 ; \\ \sigma_{\hat{G}_{8,1}}^2 &= \frac{3 \cdot 2}{(3+2)^2 (3+3)} = 0,0400 ; \\ \sigma_{\bar{G}_{8,1}} &= 0,200 ; \end{aligned} \right\} \quad (55)$$

$$\left. \begin{aligned} \hat{G}_r &= \frac{15+1}{15+2} = 0,941 ; \\ \sigma_{\hat{G}_r}^2 &= \frac{15+1}{(15+2)^2 (15+3)} = 0,00308 ; \\ \sigma_{\bar{G}_r} &= 0,0555 . \end{aligned} \right\} \quad (56)$$

Следует заметить, что можно было бы оценить конечные значения ВБР отдельных подсистем на основе непосредственного использования вероятности (10), не преобразуя ее к виду зависимости от конечной ВБР ТС P_k . В этом случае на основе результатов испытаний ТС (табл. 2) по МНО получаются следующие реализации

Таблица 3

j	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
\hat{P}_{jk}	0,94	0,88	0,94	0,93	0,93	0,92	0,92	0,92	0,92	0,94

оценок ВБР отдельных j -х подсистем, приведенные в табл. 3 с точностью до 0,01.

На основе приведенных оценок по зависимости (1) получается следующая реализация оценки конечной ВБР ТС: Полученная оценка сильно занижена по сравнению с оценкой (50) и является некорректной. Она соответствует случаю, когда оценки ВБР подсистем определяются по результатам их автономных испытаний и когда не учитывается их совместное функционирование в составе ТС. Отсюда следует, что при высокой ВБР подсистем для подтверждения ВБР ТС более эффективными являются испытания ТС в полном составе по сравнению с автономными испытаниями отдельных подсистем. Причиной этого является влияние эффекта испытаний ТС в полном составе. Если возникает задача уточнения

ВБР подсистем по результатам испытаний ТС, то ее можно решить по методике, изложенной в работе [5].

9.3. Точечное оценивание динамики ВБР

Реализация точечной оценки переменной ВБР ТС в процессе отработочных испытаний и ее дисперсия определяются по методу линеаризации по зависимостям (33) и (34) при предполагаемом числе невыявленных дефектов R на основе точечных оценок параметров (50) – (56):

$$\hat{P}_i = 0,864 \cdot \hat{G}_{3,1}(i) \cdot \hat{G}_{3,2}(i) \cdot \hat{G}_{5,1}(i) \cdot \hat{G}_{8,1}(i) \cdot 0,941^R ; \quad (57)$$

$$\sigma_{\hat{P}_i}^2 = \hat{P}_i^2 \cdot \left(\frac{0,00749}{0,864^2} + \frac{\sigma_{\hat{G}_{3,1}(i)}^2}{\hat{G}_{3,1}(i)^2} + \frac{\sigma_{\hat{G}_{3,2}(i)}^2}{\hat{G}_{3,2}(i)^2} + \frac{\sigma_{\hat{G}_{5,1}(i)}^2}{\hat{G}_{5,1}(i)^2} + \frac{\sigma_{\hat{G}_{8,1}(i)}^2}{\hat{G}_{8,1}(i)^2} + R \frac{0,00308}{0,941^2} \right) ; \quad (58)$$

$i = 1, \dots, n,$

где

$$\left. \begin{aligned} \hat{G}_{3,1}(i) &= 0,500 ; \sigma_{\hat{G}_{3,1}(i)}^2 = 0,0500 \quad \text{при } i \in [1; 2]; \\ \hat{G}_{3,2}(i) &= 0,667 ; \sigma_{\hat{G}_{3,2}(i)}^2 = 0,0317 \quad \text{при } i \in [3; 7]; \\ \hat{G}_{5,1}(i) &= 0,750 ; \sigma_{\hat{G}_{5,1}(i)}^2 = 0,0208 \quad \text{при } i \in [1; 9]; \\ \hat{G}_{8,1}(i) &= 0,600 ; \sigma_{\hat{G}_{8,1}(i)}^2 = 0,0400 \quad \text{при } i \in [1; 4]; \end{aligned} \right\} \quad (59)$$

При других значениях номеров испытаний вероятности не проявления дефектов и их дисперсии равны

$$\hat{G}_{j,q}(i) = 1, \quad \sigma_{\hat{G}_{j,q}(i)}^2 = 0.$$

Оценка динамики ВБР зависит от предполагаемого числа невыявленных дефектов R , которое можно задать при выбранном уровне гарантии с учетом данных табл. 1. Реализация оценки переменной ВБР в процессе испытаний и ее СКО вычисляются по зависимостям (57), (58) при предположении об отсутствии невыявленных дефектов показана на рис. 5. Оценки ВБР изменяются скачкообразно после номеров испытаний, при которых были выявлены дефекты и после которых были про-

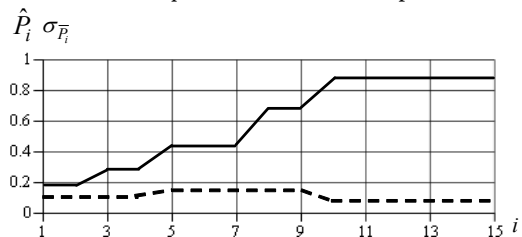


Рис. 5. Реализация оценки динамики ВБР и ее СКО при $R = 0$:

— \hat{P}_i ; - - - $\sigma_{\hat{P}_i}$

ведены доработки для их устранения. Для наглядности значения оценок при дискретных номерах испытаний соединены прямыми линиями.

9.4. Точечное оценивание достигнутого значения ВБР

Реализация точечной оценки достигнутого значения ВБР ТС в конце отработочных испытаний и ее дисперсия оперативно определяются по методу линеаризации по зависимостям (57), (58) при $i \neq n$:

$$\left. \begin{aligned} \hat{P}_n &= 0,864 \cdot 0,941^R; \\ \sigma_{\hat{P}_n}^2 &= \hat{P}_n^2 \cdot \left(\frac{0,00749}{0,864^2} + R \frac{0,00308}{0,941^2} \right) \end{aligned} \right\} \quad (60)$$

Оценка ВБР зависит от предполагаемого числа невыявленных дефектов R . Ожидаемое число таких дефектов при ограниченном числе испытаний находится в пределах $R \in [0,6; 0,7]$, см. табл. 1. При отсутствии дефектов ($R = 0$) реализация оценки достигнутого значения ВБР, ее дисперсия и СКО определяются по зависимостям (57), (58) при $i \neq n$ и совпадают с оценкой конечной ВБР (50), (51)

$$\left. \begin{aligned} \hat{P}_n &= 0,864; \\ \sigma_{\hat{P}_n}^2 &= 0,864^2 \frac{0,00749}{0,864^2} = 0,00749; \\ \sigma_{\bar{P}_n} &= 0,0865. \end{aligned} \right\} \quad (61)$$

При одном невыявленном дефекте ($R = 1$) реализация оценки достигнутой ВБР, ее дисперсия и СКО оперативно вычисляются по зависимостям (57), (58) при $i \neq n$:

$$\left. \begin{aligned} \hat{P}_n &= 0,864 \cdot 0,941 = 0,813; \\ \sigma_{\hat{P}_n}^2 &= 0,813^2 \left(\frac{0,00749}{0,864^2} + \frac{0,00308}{0,941^2} \right) = 0,00895; \\ \sigma_{\bar{P}_n} &= 0,0946. \end{aligned} \right\} \quad (62)$$

Для более точного оценивания ВБР построим плотности распределения оценок параметров P_k и G_r по зависимостям (24), (26) при полученных результатах испытаний:

$$f(p_k) = 12,7(12,7 + 1) p_k^{12,7-1} (1 - p_k); \quad (63)$$

$$f(g_r) = (15 + 1) g_r^{15}. \quad (64)$$

На основе этих плотностей реализация оценки достигнутой ВБР, ее дисперсия и СКО вычисляются по

зависимостям (37), (38) при $R = 1$

$$\bar{P}_n = \int_0^1 \dots \int_0^1 p_k g_1 f(p_k) f(g_1) dp_k dg_1 = 0,813; \quad (65)$$

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{\bar{P}_n}^2 &= \int_0^1 \dots \int_0^1 (p_k g_1 - \bar{P}_n)^2 f(p_k) f(g_1) dp_k dg_1 = 0,00895; \\ \sigma_{\bar{P}_n} &= 0,0946. \end{aligned} \right\} \quad (66)$$

Сравнение оценок (65), (66) с оценками (62) показывает, что результаты точечного оценивания достигнутой ВБР ТС, получаемые по оперативным (36) и точным зависимостям (37) и (38), совпадают.

Невысокие значения оценок ВБР ТС и их повышенные погрешности связаны с ограниченным объемом испытаний и наличием случайного отказа, принятых в рассмотренном примере. Если бы причина случайного отказа была выявлена и проведены эффективные доработки, то реализация оценки ВБР и ее СКО имели бы следующие значения:

при $R = 0$

$$\hat{P}_n = 0,932; \quad \sigma_{\bar{P}_n} = 0,0635; \quad (67)$$

при $R = 1$

$$\hat{P}_n = 0,932 \cdot 0,941 = 0,877; \quad \sigma_{\bar{P}_n} = 0,0924. \quad (68)$$

Сравнение оценок (67), (68) с оценками (61), (62) показывает, как важно определять и устранять все причины отказов ТС и планировать испытания ТС в жесточенных режимах, чтобы выявить все возможные дефекты.

9.5 Интервальное оценивание достигнутого значения ВБР

Метод интервального оценивания ВБР ТС, достигнутой в конце испытаний, зависит от предполагаемого числа невыявленных дефектов R . При отсутствии таких дефектов реализация оценки нижней доверительной границы для достигнутой ВБР ТС при $m = 1$ вычисляется по зависимости (41) при доверительной вероятности $\gamma = 0,9$:

$$(12,7 + 1) \hat{P}_{nn}^{12,7} \left(1 - \frac{12,7}{12,7 + 1} \hat{P}_{nn} \right) = 1 - 0,9. \quad (69)$$

На основе (69) численным методом получается следующая реализация оценки нижней доверительной границы для ВБР ТС: $\hat{P}_{nn} = 0,745$.

Если предполагается, что после испытаний может остаться один невыявленный дефект ($R=1$), то интервальная оценка достигнутого уровня ВБР определяется по методике п. 8.2. При построении плотности распределения

оценок достигнутой ВБР были приняты следующие размеры локальных отрезков: $\delta = 0,01$; $\Delta = 0,05$. Вычисления проводились в системе MathCAD. Полученная плотность распределения оценок достигнутого уровня ВБР показана на рис. 6.

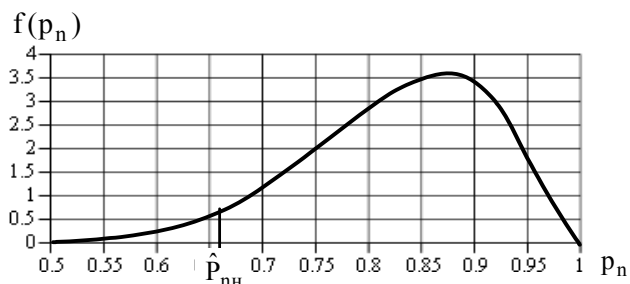


Рис. 6. Плотность распределения оценок достигнутого уровня ВБР при $R = 1$

На основе численного интегрирования этой плотности по зависимости (47) при доверительной вероятности $\gamma = 0,9$ была получена следующая реализация оценки

нижней доверительной границы для ВБР ТС: $\hat{P}_{nn} = 0,658$.

Полученные результаты показывают, что если при испытаниях ТС не выявлен и не устранен хотя бы один дефект, то нижняя доверительная граница для ВБР существенно снижается.

Рассмотренный пример и результаты вычислений подтверждают работоспособность разработанного метода контроля динамики ВБР технических систем с переменной структурой по результатам отработочных испытаний. Невысокие оценки ВБР и повышенные погрешности оценок, полученные в примере, объясняются ограниченным объемом испытаний.

Для достижения более высоких оценок ВБР и с большей точностью необходимо повышать число отработочных испытаний, ужесточать условия испытаний для выявления и устранения всех возможных дефектов, а в случае отказов ТС выявлять причины отказов и проводить эффективные доработки для их устранения.

Литература

1. Волков Л. И. Управление эксплуатацией летательных комплексов / Л. И. Волков. – М.: Высшая школа, 1987. – 400 с.
2. Волков Л. И. Контроль вероятности безотказной работы военно-технических систем по результатам отработочных испытаний / Л. И. Волков, Б. И. Сухорученков, В. Б. Гудков // Сборник трудов СИП РИА. – 2007. – Вып. 15. – С. 55 – 67.
3. Сухорученков Б. И. Математическая модель и методы оценивания и прогнозирования динамики надежности военно-технических систем при экспериментальной отработке / Б. И. Сухорученков // Двойные технологии. – 2004. – №2. – С. 4 – 12.
4. Сухорученков Б. И. Методы оценивания показателей безотказности по ограниченной выборке / Б. И. Сухорученков // Сборник трудов СИП РИА. – 2006. – Вып. 14. – С. 101–123.
5. Сухорученков Б. И. Метод оценивания динамики надежности военно-технических систем и их подсистем при отработочных испытаниях / Б. И. Сухорученков // Двойные технологии. – 2004. – № 4. – С. 39 –47.

Материал поступил в редакцию 11. 12. 2007г.