

© Лукин В. Л., Сухорученков Б. И., Швед Е. В.
Lukin V., Sukhoruchenkov B., Swed E.

КОНЦЕПЦИЯ БЕЗОТКАЗНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ДЛИТЕЛЬНОГО ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ

CONCEPTION OF FAULTLESSNESS OF TECHNICAL SYSTEMS PROTRACTED FUNCTIONING

Аннотация. Предлагается новая концепция безотказности технических систем (ТС) непрерывного или периодического функционирования. Концепция является логическим продолжением и дополнением научной статьи [2]. Показано, что повышенная интенсивность отказов ТС обусловлена дефектами, имеющими случайный характер проявления при испытаниях или эксплуатации ТС. В течение жизненного цикла интенсивность отказов ТС снижается благодаря выявлению и устранению дефектов. Конечный (потенциальный) уровень интенсивности отказов ТС зависит от возможных невыявленных дефектов. Приведены рекомендации по контролю и снижению интенсивности отказов ТС в соответствии с изложенной концепцией.

Annotation. New conception of faultlessness of the technical systems (TS) of the continuous or periodic functioning is offered. Conception is logical continuation and addition of the scientific article [2]. It is shown that enhanceable intensity of refuses of TS is conditioned by defects having casual character of display at tests or exploitation of TS. During a life cycle intensity of refuses of TS goes down due to an exposure and removal of defects. The eventual (potential) level of intensity of refuses of TS depends on the possible uneduced defects. Recommendations over are brought on control and decline of intensity of refuses of TS in accordance with the expounded conception.

Ключевые слова. Техническая система, интенсивность отказов, дефект, оценивание показателей безотказности.

Key words. Technical system, intensity of refuses, defect, evaluation of indexes of faultlessness.

1. Проблема обеспечения безотказности ТС длительного функционирования

А. Проблема ограниченной интенсивности отказов ТС. Рассматриваются сложные технические системы (ТС), функционирующие во времени, в состав которых входят различные подсистемы и блоки, которые далее именуется просто элементами. ТС могут быть невосстанавливаемыми и восстанавливаемыми длительно или периодического использования типа транспортных систем, систем связи, компьютерной и бытовой техники и др. Одним из основных свойств таких ТС является безотказность, которая характеризуется интенсивностью отказов (ИО) Λ при соблюдении установленных условий применения (эксплуатации). Для некоторых ТС

безотказность выражается средним временем безотказной работы (работы до отказа) T_{cp} , которое обратно пропорционально ИО: $T_{cp} = 1/\Lambda$. Далее будем оперировать в основном ИО. При создании ТС к ИО предъявляются требования, которые удается достичь при имеющихся ограниченных ресурсах. Требования зависят от типа ТС (восстанавливаемая или нет), от характера и важности решаемой задачи, от длительности работы ТС и др. Например, для основных систем баллистических ракет (БР) и ракет-носителей (РН) требуемое значение ИО находится в широких пределах $\Lambda_{тр} \in [0,001; 1]$ 1/час. Для ПЭВМ $\Lambda_{тр} \leq 0,0002$ 1/час ($T_{сртр} \geq 5000$ час). Однако ИО любых ТС, хотя и может приближаться к нулю, но остается ограниченной положительной величиной. Для конкретизации

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;

Швед Евгений Вадимович – кандидат физико-математических наук, доцент, Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова.

Lukin Vladimir – doctor of engineerings sciences, professor, akademik-sekretar', sections the "Engineerings problems of stability and conversion", Russian engineering academy, tel. (495) 543-36-70;

Sukhoruchenkov Boris – doctor of engineerings 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;

Swed Eugene – candidate of physical and mathematical sciences, docent, Russian University of Economics them. G.V. Plekhanov.

рассмотрения проблемы далее будем ориентироваться на ТС, способные работать безотказно в течение 1 месяца, требования к ИО которых имеет уровень $\Lambda_{\text{тр}} \leq 0,001$ 1/час. Основные элементы таких ТС должны иметь ИО $\Lambda_{\text{тр}} \leq 0,0001$ 1/час.

Уровень безотказности ТС проявляется в виде частоты отказов при испытаниях или целевом использовании ТС. При низкой ИО отказы ТС происходят редко. Поэтому каждый отказ ТС тщательно исследуется, выясняются причины отказа и проводятся доработки ТС для их устранения (для конкретной восстанавливаемой ТС или для всех ТС рассматриваемой совокупности). Однако и после этого не удастся достичь предельного значения ИО, близкого к нулю, так как не всегда однозначно определяется причина отказа и не все потенциальные причины отказов можно устранить. Кроме того, недостатков может быть много, особенно для сложных ТС с большим числом элементов, так что устранение одного из них не может существенно снизить ИО ТС. Обычно называются следующие возможные причины повышенной ИО ТС: невысокий уровень проектирования и технологии производства, недостаточный контроль качества и надежности ТС и их элементов при производстве, ограниченный период и облегченные условия отработки и испытаний ТС и ее подсистем, нарушения установленных условий целевого применения ТС. Из-за многообразия этих причин проблема снижения ИО и обеспечения высокой безотказности сложных ТС остается нерешенной.

Далее излагается версия принципиальных трудностей решения этой проблемы с учетом возможных дефектов ТС и их элементов. Источниками дефектов ТС могут быть некачественные материалы, ненормативные размеры и зазоры, нерасчетные взаимодействия и взаимовлияния элементов и подсистем, неблагоприятные сочетания условий применения, близких к предельно допустимым, и многие другие. Дефекты могут вноситься при проектировании, при производстве элементов, сборке, транспортировке и эксплуатации ТС. По области распространения возможны локальные (для одной ТС), серийные (для ТС одной партии изготовления) и общие (глобальные) (для всей совокупности ТС). По характеру проявления дефекты различаются на внезапные (без предыстории) и постепенные, развивающиеся в процессе работы ТС.

Б. Показатели возможных дефектов ТС. Под дефектами будем понимать только такие неисправности ТС, которые могут привести к отказу и невыполнению решаемой задачи. Это свойство каждого q -го дефекта будем характеризовать интенсивностью отказов ТС из-за

дефекта Λ_q (для краткости будем называть ее ИО дефекта). При $\Lambda_q \rightarrow \infty$ дефект является детерминированным; он проявляется сразу в начале работы ТС и устраняется путем проведения доработок. Однако история и практика испытаний и применения ТС различных типов показывает, что многие дефекты проявляются не сразу, а после некоторого периода нормальной работы (эксплуатации) ТС. Имеется много примеров этого из области создания, совершенствования и эксплуатации автомобилей, самолетов гражданского и военного назначения и ТС других типов. Например, известны многие случаи отзыва фирмами-изготовителями серийных образцов автомобилей для устранения дефектов, обнаруженных в период их эксплуатации.

Таким образом, ТС может содержать дефекты, которые имеют случайный характер проявления с ИО $\Lambda_q > 0$. Назовем для краткости такие дефекты случайными. Именно они могут значительно снизить безотказность ТС. Дефекты с показателями $\Lambda_q \in [\Lambda_{\text{тр}}; \infty]$ (назовем их существенными) можно выявить при входном контроле, при испытаниях и тестовых проверках и устранить на основе доработок. Если случайные дефекты не существенные (редкие), которые имеют ИО $\Lambda_q \leq \Lambda_{\text{тр}}$ (назовем их скрытыми), то они маскируются ограниченной ИО ТС и проявляются редко, поэтому их трудно выявить и устранить. Именно такие дефекты являются основной причиной ограниченной безотказности ТС после проведения цикла испытаний и принятия ТС в эксплуатацию.

2. Концепция безотказности технических систем длительного функционирования

Концепция безотказности ТС, функционирующих во времени, основана на следующих постулатах и допущениях, аналогичных изложенным в работе [2]. Изначально ТС может иметь Q дефектов с ИО $\Lambda_q \in [0; \infty]$, $q=1, \dots, Q$. Проявления дефектов взаимно независимы. При проявлении любого дефекта происходит отказ ТС. Вероятность проявления нескольких дефектов одновременно равна нулю. Поэтому начальная ИО ТС определяется по зависимости

$$\Lambda_0 = \Lambda_K + \sum_{q=1}^Q \Lambda_q, \quad (1)$$

где Λ_K – предельная (конечная, потенциальная) ИО ТС при отсутствии или выявлении и устранении всех возможных дефектов.

Для снижения и доведения ИО ТС до требуемых значений проводится цикл автономных испытаний элементов ТС и комплексных испытаний ТС (тестовых, контрольных, отработочных, приемочных, приработочных и др.), при которых выявляются и устраняются возмож-

ные дефекты. Вероятность проявления q -го дефекта в течение суммарного периода T испытаний или работы ТС определяется по экспоненциальному распределению. Если дефекты не случайные (при $\Lambda_q \rightarrow \infty$), то они проявляются сразу при первом испытании и устраняются. Такие дефекты далее не рассматриваются. Каждый q -й случайный дефект может проявиться после периода T испытаний ТС с вероятностью

$$B(Q=1) = 1 - e^{-\Lambda_q \cdot T}. \quad (2)$$

Если испытания проводятся циклами в виде серии из n испытаний ТС в течение периодов T_i каждое, то в зависимости (2) используется суммарное время испытаний $T = \sum T_i$.

Если ТС содержит Q дефектов, то вероятность выявить все дефекты в период испытаний равна

$$B(Q) = \prod_{q=1}^Q (1 - e^{-\Lambda_q \cdot T}). \quad (3)$$

Количество и показатели возможных дефектов являются основной причиной снижения потенциальной безотказности ТС. Из (2) и (3) следует, что быстрее выявляются дефекты с высокой ИО. Для повышения ИО дефектов Λ_q ужесточаются условия испытаний. Однако некоторые дефекты даже после цикла испытаний могут остаться невыявленными. Вероятность этого равна $1 - B(Q)$. Если число таких дефектов равно $Q_{ост}$, то после испытаний в течение суммарного периода T ИО ТС будет равна

$$\Lambda_T = \Lambda_K + \sum_{q=1}^{Q_{ост}} \Lambda_q. \quad (4)$$

Таким образом, в соответствии с выдвинутой концепцией ИО ТС с вероятностью $1 - B(Q)$ является ограниченной даже при $\Lambda_K \rightarrow 0$. Сложные ТС состоят из многих элементов, которые могут иметь дефекты. Поэтому даже если ИО дефектов Λ_q близки к нулю, вероятность, что все дефекты не будут выявлены и будут в дальнейшем снижать безотказность ТС, может оказаться значительной. Согласно выдвинутой концепции ТС даже после длительной отработки может иметь скрытые дефекты. Поэтому безотказность ТС ограничена, а ИО ТС, по существу, представляет собой суммарную ИО всех возможных несущественных (редких, скрытых) дефектов элементов ТС. Отказы ТС, причины которых не установлены и доработки после которых не проводятся, признаются случайными (не из-за дефектов). Однако принципиально такие отказы также могут быть вызваны скрытыми дефектами, только уровень наших знаний и ограниченные возможности диагностики не позволяют определить причины всех возможных отказов.

Показатели дефектов Λ_q могут изменяться в зависимости от условий испытаний и использования ТС. Чтобы снизить ИО ТС, необходимо устранить возможные дефекты, а чтобы быстрее их выявить, необходимо повысить ИО дефектов. Для этого можно ужесточить условия испытаний и проводить их при экстремальных условиях и действующих факторах, близких к предельно допустимым, а также при различных неблагоприятных сочетаниях их. Для сложных ТС практически невозможно обеспечить проведение испытаний при экстремальных условиях и неблагоприятных сочетаниях всех действующих факторов. Так как основная доля возможных дефектов принадлежит элементам ТС, то выявлять и устранять дефекты целесообразно на основе автономных испытаний элементов ТС различного уровня, при которых легче создать экстремальные условия. Кроме того, для устранения возможных дефектов необходимо, во-первых, иметь совершенную диагностическую аппаратуру и методы диагностики при испытаниях ТС и их элементов, и, во-вторых, обеспечивать эффективное устранение каждого выявленного дефекта.

3. Анализ вероятностей выявления возможных дефектов ТС и их элементов

3.1. Вероятности выявления отдельных дефектов ТС

Возможные случайные дефекты ТС можно выявить только на основе проведения испытаний или анализа результатов работы ТС в течение некоторого периода времени (или нескольких периодов, циклов, отрезков времени). Вероятность выявления одного дефекта ТС с ИО Λ_q зависит от суммарного времени испытаний T и определяется по зависимости (2). Для обобщения и наглядности результатов исследований здесь и далее будем рассматривать нормированный безразмерный период работы ТС $\tau = \Lambda_q \cdot T$. В этом случае вероятность (2) выявления дефекта можно представить в виде зависимости только от относительного периода испытаний τ , см. рис. 1

$$B_1 = 1 - e^{-\Lambda_q \cdot T} = 1 - e^{-\tau}. \quad (5)$$

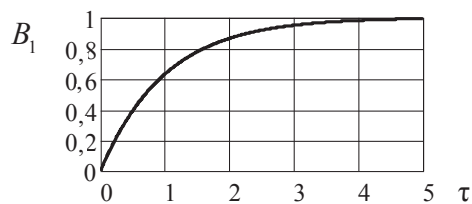


Рис. 1. Зависимость вероятности выявления дефекта ТС от нормированного суммарного периода испытаний

Из рис. 1 видно, что для достоверного выявления дефекта с вероятностью $B_1 = 0,9$ необходимо провести испытания ТС в течение периода $\tau \geq 2,5$ или в течение суммарного времени $T \geq \tau/\Lambda_q$. Если для ТС задаются требования к ИО $\Lambda_{тр} = 0,001$ 1/час, то для выявления скрытого дефекта с ИО $\Lambda_q \leq \Lambda_{тр}$ необходимо провести испытания ТС в течение суммарного периода $T \geq 2500$ часов. Для выявления скрытого дефекта основных элементов ТС с ИО $\Lambda_{тр} = 0,0001$ 1/час потребуются испытания элементов в течение периода $T \geq 25000$ часов (почти 3 года). Срок испытаний можно сократить, если привлечь к испытаниям сразу несколько ТС или их элементов. Однако и в этом случае провести такие длительные испытания зачастую оказывается не реально по технико-экономическим показателям. Поэтому возможные дефекты ТС и ее элементов могут остаться невыявленными и снизить безотказность ТС.

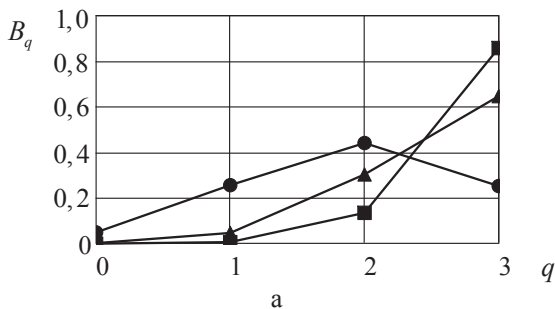
3.2. Вероятности выявления нескольких дефектов

Теоретически начальное число Q дефектов ТС и их элементов может быть любым от нуля и выше. Вероятности выявления ровно q дефектов из Q , имеющих одинаковые ИО $\Lambda_q = \text{const} = \Lambda$, определяются с учетом (5) по биномиальному распределению

$$B_q = C_Q^q \cdot B_1^q \cdot (1 - B_1)^{Q-q}, \quad q = 0; 1; \dots; Q, \quad (6)$$

где C_Q^q – число сочетаний из Q по q .

Вероятности (6) числа выявляемых дефектов при предположении, что ТС или ее элементы после изготовления могут иметь от 3 до 5 дефектов, при некоторых значениях нормированного периода испытаний $\tau = T \cdot \Lambda_q \in [1; 3]$ показаны на рис. 2.



3 до 5 скрытых дефектов, то для выявления дефектов требуется провести испытания ТС в течение суммарного периода $T \geq \tau/\Lambda_{тр} = 3000$ часов. При ограниченном периоде испытаний ТС может остаться несколько невыявленных дефектов, которые могут снизить безотказность ТС.

Ожидаемое число выявляемых дефектов из возможных Q дефектов определяется на основе (6) по зависимости

$$M[q] = \sum_{q=0}^Q q \cdot B_q. \quad (7)$$

Зависимости (7) показаны на рис. 3.

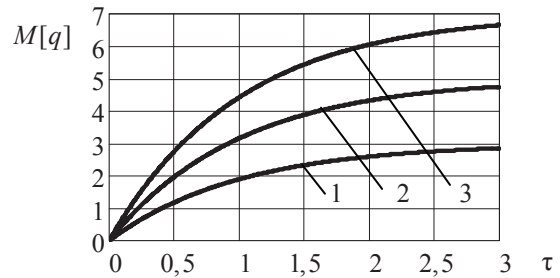


Рис. 3. Зависимости ожидаемого числа выявляемых дефектов от нормированного периода испытаний τ при некоторых начальных объемах Q возможных дефектов:

1 – $Q=3$; 2 – $Q=5$; 3 – $Q=7$

Из рис. 3 видно, что выявить почти все возможные дефекты ТС при $Q \in [3; 7]$ можно только при большом периоде испытаний $\tau > 3$. Для элементов ТС с ИО $\Lambda_{тр} \leq 0,0001$ 1/час соответствующий период испытаний равен $T > \tau/0,0001 = 30000$ часов или $T > 3$ лет. Так как обеспечить такой период автономных испытаний элементов трудно, то после серии испытаний в составе ТС могут остаться скрытые дефекты и ограничить безотказность ТС.

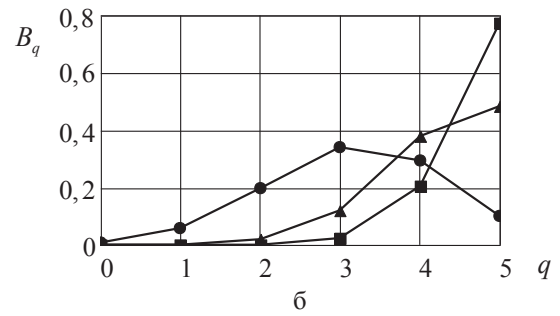


Рис. 2. Вероятности выявления q дефектов из возможных Q дефектов при $Q = 3$ (а) и $Q = 5$ (б) при некоторых периодах испытаний τ

● ● ● – $\tau = 1$; ▲ ▲ ▲ – $\tau = 2$; ■ ■ ■ – $\tau = 3$

Из рис. 2 и зависимости (6) следует, что для выявления всех возможных дефектов $Q \in [3; 5]$ с вероятностью $B \in [0,8; 0,9]$ необходимо провести испытания ТС в течение относительного периода $\tau \geq 3$. Это означает, что если ТС имеет ИО $\Lambda_{тр} = 0,001$ 1/час и может содержать от

Результаты проведенных исследований показывают, что ограничение безотказности ТС является принципиальным, так как при имеющихся ресурсах невозможно выявить и устранить все возможные скрытые дефекты с низкими ИО $\Lambda \rightarrow 0$. Поэтому ИО любых ТС, особенно

сложных ТС с большим числом элементов, всегда выше нуля.

4. Статистическое оценивание показателей дефектов ТС и их элементов

В соответствии с изложенной концепцией безотказность ТС при эксплуатации зависит от ИО невыявленных дефектов. Для контроля ИО ТС необходимо знать ИО таких дефектов и их возможное число. Оценки этих показателей можно получить на основе результатов испытаний с использованием статистических методов.

Если проведены испытания ТС или ее элемента в течение суммарного периода T , то в соответствии с методом несмещенных оценок (МНО) [1, 3, 4] плотность вероятности (ПВ) возможных оценок λ ИО дефекта как случайной величины определяется по зависимости:

- если дефект проявился в момент $t \leq T$

$$f(\lambda) = t^2 \cdot \lambda \cdot e^{-\lambda t}; \quad (8)$$

- если дефект не проявился в течение периода T

$$f(\lambda) = t^2 \cdot \lambda \cdot e^{-\lambda t}. \quad (9)$$

Плотности вероятности оценок ИО дефектов по результатам испытаний ТС в течение нормированного периода $T = 1$ показаны на рис. 4.

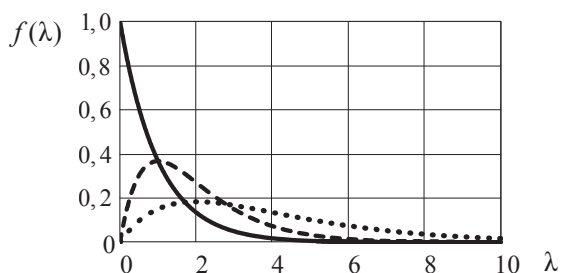


Рис. 4. Плотности вероятности оценок ИО дефектов при $T = 1$: невыявленного дефекта – сплошная; выявленных дефектов в моменты $t = 0,5T$ – пунктирная; $t \rightarrow T$ – точечная

Из рис. 4 видно, что ПВ оценок ИО проявившегося дефекта отличается от ПВ нормального распределения, а для возможного не проявившегося дефекта ПВ соответствует экспоненциальному распределению. При этом наиболее вероятными являются значения ИО возможного не проявившегося дефекта, близкие к нулю: $\lambda \rightarrow 0$.

На основе ПВ (8) и (9) получаются следующие зависимости для вычисления несмещенных точечных оценок ИО возможных q -х дефектов и их дисперсий как для первых моментов распределения [4]:

- для q -го дефекта, проявившегося в момент t_q

$$\bar{\lambda}_q = \frac{2}{t_q}; \quad \sigma_{\bar{\lambda}_q}^2 = \frac{2}{t_q^2}; \quad q = 1; 2; \dots \quad (10)$$

- для возможного не проявившегося дефекта после

периода испытаний T

$$\bar{\lambda}_q = \frac{1}{T}; \quad \sigma_{\bar{\lambda}_q}^2 = \frac{1}{T^2}; \quad q = 1; 2; \dots \quad (11)$$

На основе ПВ оценок ИО дефектов (8) или (9) можно также оценить доверительные границы для ИО дефектов $[\Lambda_H; \Lambda_B]$ при заданной доверительной вероятности γ на основе соотношений

$$\int_0^{\bar{\lambda}_H} f(\lambda) d\lambda = 1 - \gamma_H; \quad \int_0^{\bar{\lambda}_B} f(\lambda) d\lambda = \gamma_B, \quad (12)$$

где γ_H, γ_B – вероятности, выбираемые из условия: $\gamma_H + \gamma_B = 1 + \gamma$; часто назначаются $\gamma_H = \gamma_B = 0,5(1 + \gamma)$.

Из (11) следует, что в реальных условиях ограниченных ресурсов (ограниченного периода T) оценки ИО возможных скрытых дефектов ТС и ее элементов всегда выше нуля.

5. Оценивание показателей безотказности ТС и элементов по результатам испытаний с учетом дефектов

На основе изложенной концепции можно обосновать метод оценивания показателей безотказности ТС и их элементов по результатам испытаний с учетом возможных скрытых дефектов. Если проведены испытания ТС или элементов 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 и ее дисперсия при предполагаемом числе $Q_{\text{ост}}$ невыявленных дефектов с учетом их независимости определяется на основе (4) при оценках входящих в нее параметров:

$$\bar{\lambda}_T = \bar{\lambda}_K + Q_{\text{ост}} \cdot \bar{\lambda}_q; \quad \sigma_{\bar{\lambda}_T}^2 = \sigma_{\bar{\lambda}_K}^2 + Q_{\text{ост}} \cdot \sigma_{\bar{\lambda}_q}^2, \quad (13)$$

где оценки ИО оставшихся (скрытых) дефектов вычисляются по зависимостям (11), а оценка предельной ИО и ее дисперсия независимо от числа выявленных при испытаниях и устраненных дефектов определяются по формулам [3]

$$\bar{\lambda}_K = \frac{m+1}{T}; \quad \sigma_{\bar{\lambda}_K}^2 = \frac{m+1}{T^2}. \quad (14)$$

На основе формул (11) и (14) зависимость (13) для оценки достигнутой ИО и ее дисперсии преобразуется к виду

$$\bar{\lambda}_T = \frac{m+1+Q_{\text{ост}}}{T}; \quad \sigma_{\bar{\lambda}_T}^2 = \frac{m+1+Q_{\text{ост}}}{T^2}. \quad (15)$$

Из (15) 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 отказов и возможных скрытых дефектов. Число возможных оставшихся дефектов $Q_{\text{ост}}$ можно только предполагать. При вы-

боре $Q_{\text{ост}}$ учитываются оценки вероятностей выявления дефектов, приведенные в п. 3. При этом возможны оптимистичные оценки ИО при $Q_{\text{ост}} = 0$ и пессимистичные оценки при $Q_{\text{ост}} \geq 1$. Для снижения 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.

Приведенные результаты свидетельствуют, что в соответствии с выдвинутой концепцией для повышения достоверности контроля безотказности ТС необходимо учитывать возможные скрытые дефекты, не выявленные при испытаниях.

6. Следствия выдвинутой концепции

На основе выдвинутой концепции можно сформулировать следующие основные выводы, следствия и рекомендации.

1. ТС и их элементы изначально могут содержать дефекты, проявление которых приводит к отказу и которые ограничивают безотказность ТС. Для повышения безотказности ТС необходимо выявить и устранить как можно больше дефектов. Поэтому представленная концепция подтверждает актуальность существующей системы мероприятий по обеспечению и повышению надежности ТС и их элементов на протяжении всего жизненного цикла.

2. Возможные дефекты ТС проявляются не сразу и случайным образом, поэтому достоверно выявить и устранить дефекты до использования ТС по назначению можно только на основе серии отработочных испытаний.

3. Вероятности проявления дефектов возрастают при ужесточении условий испытаний или эксплуатации ТС. Поэтому для повышения числа и вероятности выявления возможных дефектов необходимо создавать жесточенные условия испытаний.

4. Для сложных ТС создать такие условия, при которых все возможные факторы были бы экстремальными, практически невозможно. В то же время основная

доля возможных дефектов принадлежит элементам ТС. Поэтому дефекты целесообразно выявлять на этапах автономных отработочных испытаний элементов ТС. При этом желательно проводить испытания при нагрузках и факторах по возможности за пределами допустимых.

5. При отказе ТС часто не удастся достоверно установить причину отказа. Поэтому необходимо повышать качество аппаратуры диагностики причин отказов элементов ТС при автономных испытаниях и ТС при комплексных испытаниях, чтобы определять эффективные способы устранения дефектов.

6. При испытаниях и эксплуатации ТС иногда не удается полностью устранить причину отказа. Бывают даже случаи, когда при доработках вносятся новые дефекты. Поэтому необходимо повышать качество (эффективность) проводимых доработок для надежного устранения выявленных дефектов.

7. Дефекты ТС периодического использования могут развиваться во времени, так что вероятность их проявления может повышаться в периоды между циклами работы. Поэтому для таких ТС необходимо контролировать техническое состояние ТС перед каждым применением.

8. Все возможные дефекты ТС и их элементов практически невозможно устранить даже при длительном периоде отработочных испытаний. Поэтому безотказность ТС, особенно сложных ТС, всегда ограничена (ИО ТС $\Lambda > 0$). По существу, ИО ТС представляет собой сумму ИО Λ_q всех возможных скрытых дефектов (с показателями $\Lambda_q \rightarrow 0$), не выявленных на предыдущих этапах отработки ТС и ее элементов.

9. В соответствии с выдвинутой концепцией при контроле безотказности ТС и обосновании решения о соответствии ее заданным требованиям необходимо учитывать возможность наличия скрытых (невыявленных) дефектов. Для оценки интенсивности отказов ТС и их элементов с учетом возможных дефектов можно использовать зависимости п.5.

Литература

1. Волков Л. И., Лукин В. Л., Сухорученков Б. И. Методы статистического контроля надежности технических систем. Юбилейный: ЗАО «ПСТМ», 2008.
2. Лукин В. Л., Сухорученков Б. И. Концепция безотказности технических систем. // Двойные технологии, № 3 (64). 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. 07. 2013 г.