

УДК 519.248 + 629.7.01

© Лукин В. Л., Сухорученков Б.И., Швед Е.В., Жуков П.А.
Lukin V., Sukhoruchenkov B., Swed E., Zhukov P.

КОНЦЕПЦИЯ БЕЗОТКАЗНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

CONCEPTION OF FAULTLESSNESS OF TECHNICAL SYSTEMS

Аннотация. Предлагается новая концепция безотказности технических систем (ТС). Показано, что ограниченная безотказность ТС обусловлена дефектами, имеющими случайный характер проявления при испытаниях или эксплуатации ТС. В течение жизненного цикла безотказность ТС улучшается благодаря выявлению и устранению дефектов. Конечный (потенциальный) уровень безотказности ТС зависит от возможных невыявленных дефектов. Приведены рекомендации по контролю и повышению безотказности ТС в соответствии с изложенной концепцией.

Annotation. New conception of faultlessness of the technical systems (TS) is offered. It is shown that the limit faultlessness of TS is conditioned by defects having casual character of display at tests or exploitation of TS. During a life cycle the faultlessness of TS gets better due to an exposure and removal of defects. The eventual (potential) level of faultlessness of TS depends on the possible undetected defects. Recommendations over are brought on control and increase of faultlessness TS in accordance with the expounded conception.

Ключевые слова. Техническая система, безотказность, вероятность безотказной работы, дефект, вероятность неоявления дефекта, оценка безотказности по результатам испытаний.

Key words. Technical system, faultlessness, probability of faultless work, defects, probability of undisplay of defect, estimation of faultlessness on results tests.

1. Проблема обеспечения безотказности ТС

А. Проблема ограниченной вероятности безотказной работы ТС. Рассматриваются сложные технические системы (ТС) с иерархической структурой, которая включает подсистемы, блоки, детали и соединительные устройства. Далее все основные составляющие ТС именуются просто элементами. ТС могут быть невосстанавливаемыми одноразового использования типа баллистических ракет (БР) и ракет-носителей (РН) и восстанавливаемыми периодического использования типа транспортных систем, систем связи, компьютерной и бытовой техники и др. Одним из основных свойств, влияющих на эффективность ТС, является безотказность. Будем характеризовать безотказность вероятностью безотказной работы (ВБР) ТС в течение периода целевого использования или отдельного цикла работы при соблюдении

установленных условий применения (эксплуатации). При создании ТС затрачиваются значительные технико-экономические ресурсы для достижения требуемой ВБР. В результате ВБР P современных ТС имеет высокий уровень и приближается к единице. Однако чем сложнее ТС (чем больше элементов она содержит), тем ниже ее ВБР. Поэтому для ТС предъявляются ограниченные требования P_{TP} к их ВБР, которую удается достичь при имеющихся ограниченных ресурсах. Для БР и РН значение $P_{TP} \in [0,95; 0,98]$. Для их основных подсистем РТР $P_{TP} \in [0,995; 0,999]$. Для ПЭВМ в течение рабочего дня (8 часов работы) $P_{TP} > 0,9998$. При этом ВБР любых ТС, хотя и может приближаться к единице, но остается ограниченной.

Уровень безотказности ТС проявляется в виде частоты (числа) отказов при испытаниях или применении ТС. При высокой ВБР ТС отказы происходят редко. По-

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;

Жуков Павел Андреевич – кандидат технических наук, доцент, проректор-исполнительный директор, МНЮИ.

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;

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

Zhukov Pavel – Ph.D., associate professor, vice president-executive director, MNYUI.

этому каждый отказ ТС тщательно исследуется, выясняются причины отказа и проводятся доработки ТС для их устранения. Однако и после этого не удается достичь значения $ТС P=1$, так как не все потенциальные причины отказов можно установить, не всегда удается однозначно определить причину отказа, при этом и доработки могут быть не эффективными. Кроме того, недостатков может быть много, особенно для сложных ТС с большим числом элементов, так что устранение одного из них не может существенно повысить ВБР ТС. Обычно называются следующие возможные причины ограниченной безотказности ТС: невысокий уровень проектирования и технологии производства, недостаточный контроль качества и надежности ТС и их элементов при производстве, ограниченный период и облегченные условия отработки ТС и ее подсистем, нарушения установленных условий применения (эксплуатации) ТС. Из-за многообразия этих причин проблема повышения и достижения высокой безотказности сложных ТС до уровня $P \rightarrow 1$ остается нерешенной.

Б. Возможные дефекты ТС. Далее делается попытка научного исследования причин ограниченной безотказности ТС и обоснования возможностей повышения ВБР ТС. Для этого обозначим все возможные неисправности, которые могут привести к отказу ТС, как дефекты. Источниками дефектов ТС могут быть некачественные материалы, выход технических характеристик за допустимые пределы, 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, при 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.

В. Показатели возможных дефектов ТС. Под дефектами будем понимать только существенные неисправности ТС и их элементов, проявление которых приводит к отказу ТС. Большое разнообразие дефектов ТС затрудняет их анализ. Общим свойством всех дефектов является только то, что проявление любого из них вызывает отказ ТС. С точки зрения безотказности ТС это свойство будем характеризовать одним показателем – вероятностью G не проявления (скрытости, маскировки) дефекта. При $G=0$ дефект является детерминированным;

он проявляется сразу при первом испытании или первом цикле работы ТС и устраняется путем проведения доработок. Однако история использования ТС и практика испытаний и эксплуатации ТС различных типов показывает, что многие дефекты проявляются не сразу, а после некоторого числа успешных испытаний или некоторого периода нормальной работы (эксплуатации) ТС. Имеется много примеров этого из области создания, совершенствования и эксплуатации автомобилей, самолетов гражданского и военного назначения, БР и РН, а также ТС других типов. Например, в процессе эксплуатации первых 8 самолетов «Суперджет-100» в течение 2012 г. было выполнено примерно 1900 рейсов. В процессе подготовки и выполнения рейсов обнаружено и устранено более 550 неисправностей на земле и более 500 неисправностей в полете. Эти данные свидетельствуют, что неисправности ТС может быть много и что неисправности обнаруживаются не сразу, а случайным образом в процессе проверок или штатного функционирования ТС. Кроме того, нет уверенности, что при таком высоком потоке недостатков все возможные неисправности удастся своевременно обнаружить и устранить. Известны многие случаи отзыва фирмами-изготовителями серийных образцов автомобилей для устранения дефектов, обнаруженных в период их эксплуатации. Аварии РН в последнее время также подтверждают, что, несмотря на большой период использования хорошо отработанных образцов РН, отдельные их дефекты выявляются до сих пор.

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

2. Концепция безотказности технических систем

Существующие руководящие документы [2, 3] не рассматривают динамику показателей безотказности ТС. В отличие от этого выдвигаемая концепция безотказности ТС основана на следующих постулатах и допущениях, отражающих изменение ВБР ТС в процессе жизненного

цикла. ТС после изготовления может иметь Q дефектов с показателями (вероятностями непрявления) $G_q \in [0; 1]$, $q=1, \dots, Q$. При проявлении любого дефекта происходит отказ ТС. Основное число дефектов принадлежит элементам ТС. Проявления дефектов взаимно независимы. Вероятность проявления нескольких дефектов одновременно равна нулю. Поэтому начальная ВБР ТС определяется по зависимости

$$P_0 = P_K \prod_{q=1}^Q G_q, \quad (1)$$

где P_K – предельная (конечная, потенциальная) ВБР ТС при отсутствии или выявлении всех возможных дефектов.

Количество и показатели возможных дефектов являются основной причиной снижения потенциальной безотказности ТС. Поэтому для выявления и устранения дефектов проводится серия автономных испытаний элементов и комплексных испытаний ТС (тестовых, контрольных, отработочных, приработочных и др.). Вероятность проявления каждого q -го дефекта при каждом испытании ТС равна $1-G_q$. Если дефекты не случайные (при $G_q=0$), то они проявляются сразу при первом испытании и устраняются. Такие дефекты далее не рассматриваются. Каждый возможный q -й случайный дефект может проявиться после n испытаний с вероятностью

$$B_q = 1 - G_q^n, \quad q = 1, \dots, Q. \quad (2)$$

Если ТС содержит Q дефектов, то вероятность выявить все дефекты при n испытаниях равна

$$B(Q) = \prod_{q=1}^Q (1 - G_q^n), \quad Q < n. \quad (3)$$

Из (2) и (3) следует, что быстрее выявляются дефекты с низкой вероятностью G . Для снижения показателей дефектов G ужесточаются условия испытаний. Однако некоторые особенно скрытые дефекты даже после цикла испытаний могут остаться невыявленными. Вероятность этого равна $1-B(Q)$. Если число таких дефектов равно $Q_{ост}$, то после n испытаний ВБР ТС достигает значения

$$P_n = P_K \prod_{q=1}^{Q_{ост}} G_q. \quad (4)$$

Таким образом, в соответствии с выдвинутой концепцией в начальный период жизненного цикла ВБР ТС повышается благодаря выявлению и устранению возможных дефектов. При этом с вероятностью $1-B(Q)$ ВБР ТС остается ограниченной даже при $P_K \rightarrow 1$. Сложные ТС состоят из многих элементов, которые могут иметь дефекты. Поэтому даже если показатели дефектов G_q близки к 1 (скрытые дефекты), то вероятность того, что некоторые дефекты окажутся невыявленными и будут в даль-

нейшем снижать ВБР ТС, может оказаться значительной. Даже после длительной отработки ТС может иметь скрытые дефекты. Поэтому безотказность любой ТС практически всегда ограничена и в значительной степени характеризуется вероятностью непрявления возможных скрытых дефектов элементов ТС. В отличие от существующих взглядов на безотказность ТС изложенная концепция, основанная на анализе архитектуры ВБР ТС с учетом ее динамики, открывает новые возможности для определения путей повышения безотказности ТС.

Показатели дефектов G зависят от условий и длительности целевого использования ТС. Для оперативности выявления возможных дефектов необходимо снижать их показатели G . С этой целью 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 создать условия испытаний, при которых все действующие факторы достигают экстремальных значений. В то же время основная доля возможных дефектов принадлежит элементам ТС. Поэтому выявление дефектов целесообразно проводить на основе автономных испытаний элементов ТС, при которых легче обеспечить совокупность экстремальных показателей возможных действующих факторов.

Из (4) следует, насколько важно для обеспечения высокой безотказности ТС выявить и устранить все возможные дефекты ТС и их элементов. Для этого необходимо совершенствовать организационные и методические основы отработочных испытаний ТС, повышать качество диагностической аппаратуры и достоверность методов диагностики для выявления дефектов, а также обеспечивать эффективное устранение каждого выявленного дефекта.

3. Анализ вероятности выявления возможных дефектов ТС и их элементов

3.1. Вероятность выявления отдельных дефектов ТС

Возможные случайные дефекты ТС можно выявить только на основе проведения серии испытаний или по результатам работы ТС в течение нескольких периодов (циклов, отрезков времени). Вероятность выявления одного дефекта ТС с показателем G зависит от числа испытаний n и определяется по зависимости (2). Изменение вероятности выявления дефекта от показателя $G \in [0; 1]$ при вариациях объема испытаний показано на рис. 1.

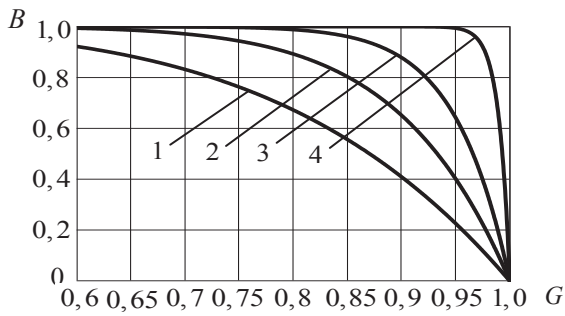


Рис. 1. Зависимости вероятности выявления дефекта ТС от показателя G при некоторых объемах испытаний n :
1 – $n = 5$; 2 – $n = 10$; 3 – $n = 20$; 4 – $n = 100$

Рассмотрим ТС с ВБР, равной требуемой: $P_{TP} = 0,95$. При этом существенными дефектами будут дефекты с показателями $G \in [0; 0,95]$. Из рис. 1 видно, что при ограниченном объеме испытаний (при $n \approx 10$) существенные дефекты ТС выявляются с вероятностью $B \in [0,4; 1]$. Скрытые дефекты с показателями $G > 0,95$, соизмеримыми с ВБР ТС, с вероятностью $B \geq 0,6$ могут остаться невыявленными и снизить безотказность ТС. Для устранения скрытых дефектов ТС необходимо выявлять их на предыдущих этапах автономных испытаний элементов ТС.

3.2. Вероятность выявления отдельных дефектов элементов ТС

Основные элементы ТС должны иметь высокие ВБР $P > 0,995$. Поэтому для них существенными являются дефекты с показателями $G \in [0; 0,995]$, а скрытыми являются дефекты с показателями $G > 0,995$. Вероятность выявления одного дефекта элементов ТС в соответствии с формулой (2) зависит от показателя G и от числа испытаний n , см. рис. 2.

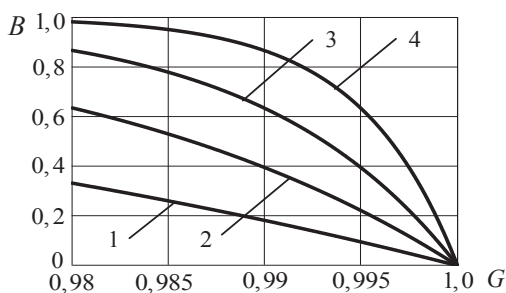


Рис. 2. Зависимости вероятности выявления дефекта элементов ТС от показателя G при некоторых объемах испытаний n :
1 – $n = 20$; 2 – $n = 50$; 3 – $n = 100$; 4 – $n = 200$

Из рис. 2 видно, что существенные дефекты элементов ТС можно выявить с вероятностью $B \geq 0,6$ только при большом числе испытаний $n \geq 200$. Скрытые дефекты с показателями, соизмеримыми с ВБР элементов ТС, с вероятностью $B \geq 0,4$ могут остаться невыявленными даже после 200 испытаний.

3.3. Зависимость вероятности выявления отдельных скрытых дефектов от числа испытаний

Вероятности выявления скрытых дефектов ТС и их элементов повышаются при увеличении объема испытаний, см. рис. 3.

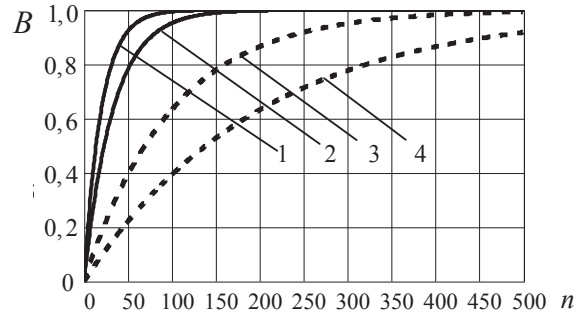


Рис. 3. Зависимости вероятности выявления скрытых дефектов от числа испытаний n при некоторых показателях дефектов G :
1 – $G = 0,95$; 2 – $G = 0,97$; 3 – $G = 0,99$; 4 – $G = 0,995$

Из рис. 3 следует, что для достоверного (с вероятностью $B = 0,9$) выявления скрытых дефектов ТС с показателями $G > 0,95$ необходимо более 40 испытаний ТС, а для выявления скрытых дефектов основных элементов ТС с показателями $G > 0,995$ требуется более 450 испытаний. Такие большие объемы испытаний обычно не удается осуществить из-за ограниченных ресурсов.

Результаты исследований показывают, что при ограниченных объемах отработочных испытаний ТС и их элементов практически невозможно выявить скрытые дефекты. Поэтому такие дефекты могут остаться и ограничить ВБР ТС после принятия в эксплуатацию.

3.4. Вероятность выявления нескольких скрытых дефектов ТС и их элементов

А. Вероятности выявления нескольких дефектов ТС. Теоретически число Q дефектов ТС и их элементов может быть любым от нуля и выше. Так как при каждом испытании может проявиться не более одного дефекта, то для выявления всех дефектов необходимо провести не менее Q испытаний. Так как число испытаний ограничено, то теоретически возможно выявление только ограниченного числа дефектов $Q \leq n$. Вероятность выявления ровно q дефектов из максимально возможного числа $Q=n$, имеющих одинаковые показатели G , определяется по биномиальному распределению по формуле $B(n, G, q) = C_n^q G^{n-q} (1-G)^q$, $q = 0; 1; \dots; Q \leq n$, (5) где C_n^q – число сочетаний из n по q .

Вероятности выявления ровно q дефектов ТС с показателями $G = 0,95$ при $Q = n$ при некоторых объемах испытаний показаны на рис. 4. Видно, что при огра-

ниченном числе испытаний ТС $n \leq 10$ практически можно выявить только не более 3 дефектов из возможных 10.

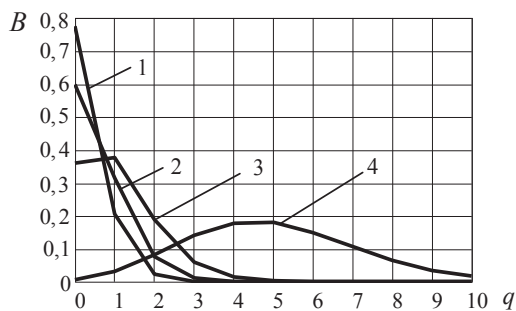


Рис. 4. Вероятности выявления q дефектов с показателями $G = 0,95$ при вариациях числа испытаний n :
1 - $n = 5$; 2 - $n = 10$; 3 - $n = 20$; 4 - $n = 100$

Вероятность того, что при n испытаниях будет выявлено не менее q дефектов из максимально возможного числа дефектов $Q=n$ определяется с учетом (5) по зависимости

$$B(n, G, q) = \sum_{q=q}^Q C_n^q G^{n-q} (1-G)^q, \quad q = 0, 1, \dots, Q; \quad Q=n. \quad (6)$$

Вероятности выявления q и более скрытых дефектов ТС с показателями $G=0,95$ при некоторых объемах испытаний показаны на рис. 5.

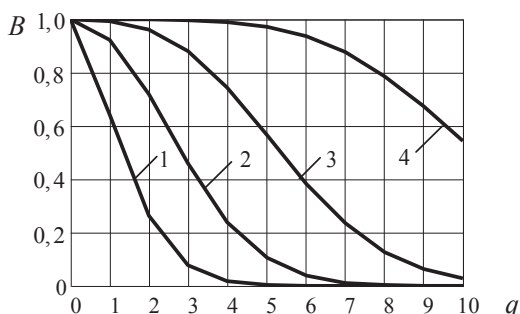


Рис. 5. Вероятности выявления не менее q скрытых дефектов с показателями $G=0,95$ при некоторых числах испытаний:
1 - $n = 20$; 2 - $n = 50$; 3 - $n = 100$; 4 - $n = 200$

Из рис. 5 видно, что для выявления 2 и более возможных скрытых дефектов ТС с вероятностью $B = 0,9$ необходимо более 100 испытаний. Так как это практически не осуществимо, а число возможных скрытых дефектов может быть больше 2, то после принятия ТС в эксплуатацию возможно наличие скрытых дефектов.

Б. *Вероятности выявления нескольких дефектов элементов ТС.* Для элементов ТС ситуация с выявлением возможных дефектов еще сложнее. Вероятности выявления не менее q скрытых дефектов основных элементов ТС с показателями $G = 0,995$ показаны на рис. 6.

Видно, что для достоверного выявления (с вероятностью $B=0,9$) 2 и более возможных скрытых дефектов элементов ТС необходимо провести более 500 испы-

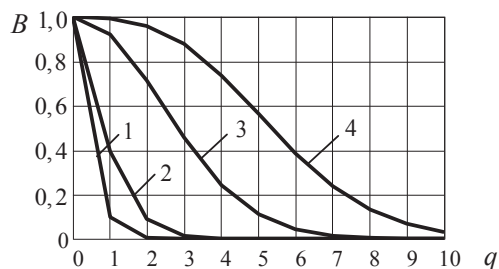


Рис. 6. Вероятности выявления не менее q скрытых дефектов с показателями $G=0,995$ при некоторых числах испытаний:

1 - $n = 20$; 2 - $n = 100$; 3 - $n = 500$; 4 - $n = 1000$
таний, что практически не реализуемо. Поэтому каждый элемент ТС после цикла отработочных испытаний может содержать несколько скрытых дефектов. Так как ТС состоит из многих элементов, то ТС может иметь значительное число скрытых дефектов.

В. *Число выявляемых дефектов ТС и их элементов.* Число возможных выявляемых дефектов ТС и основных элементов зависит от параметров n, G и Q и определяется на основе формулы (5). Если задать вероятность $B=0,9$, то на основе (5) можно получить зависимости числа выявляемых скрытых дефектов от числа испытаний при некоторых показателях G , которые показаны на рис. 7.

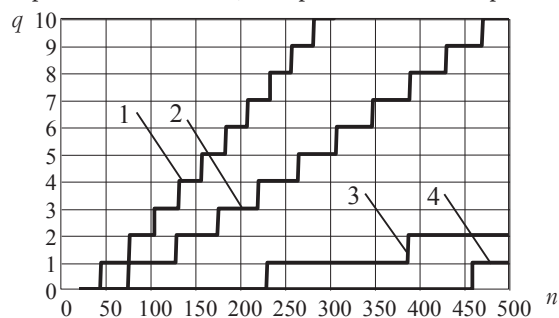


Рис. 7. Вероятности выявления q дефектов с вероятностью $B=0,9$ в зависимости от числа испытаний n :

1 - $G = 0,95$; 2 - $G = 0,97$; 3 - $G = 0,99$; 4 - $G = 0,995$

Из рис. 7 видно, что при числе испытаний ТС $n=50$ с вероятностью 0,9 можно выявить только один скрытый дефект (с показателем $G=0,95$). Для основных подсистем ТС даже при числе испытаний $n=200$ не удастся надежно (с вероятностью 0,9) обнаружить ни одного скрытого дефекта (с показателем $G=0,99-0,995$).

Число испытаний ТС и их элементов ограничено из-за ограниченных ресурсов. Поэтому даже после серии автономных испытаний элементов и комплексных испытаний ТС в составе ТС могут оказаться скрытые дефекты, которые ограничивают безотказность ТС и снижают ее ВБР.

Результаты исследований свидетельствуют, что ограничение безотказности ТС является принципиальным, так как при ограниченных ресурсах невозможно

выявить и устранить все возможные скрытые дефекты с высокими показателями $G \rightarrow 1$, но не равными единице. Поэтому ВБР любых ТС, особенно сложных ТС с большим числом элементов, всегда меньше единицы. При этом основной причиной ограниченной ВБР ТС, достигаемой после цикла отработочных испытаний и определяемой по зависимости (4), является не потенциальная ВБР РК, а возможные скрытые дефекты.

4. Статистическое оценивание показателей возможных дефектов ТС и их элементов

Для практического использования изложенной концепции с целью анализа и повышения безотказности ТС необходимо знать показатели возможных дефектов. Оценки этих показателей можно получить на основе результатов испытаний с использованием статистических методов.

Если в процессе испытаний дефект проявился при n -м испытании, то в соответствии с методом несмещенных оценок (МНО) [1, 5] плотность вероятности (ПВ) возможных оценок g показателя дефекта G как случайной величины определяется по зависимости

$$f(g) = n(n+1)g^{n-1}(1-g). \tag{7}$$

Если при n испытаниях дефект не проявился, то ПВ оценок g показателя дефекта определяется по формуле [1, 5]

$$f(g) = (n+1)g^n. \tag{8}$$

Плотности вероятности оценок показателей дефектов показаны на рис. 8.

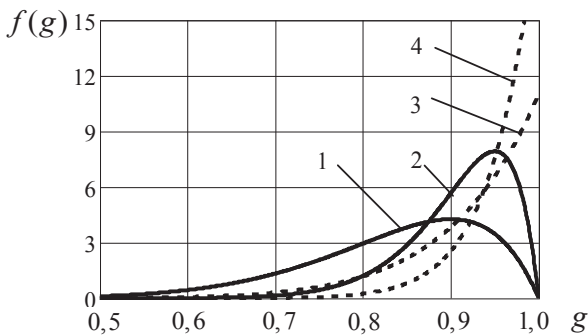


Рис. 8. Плотности вероятности оценок показателей G выявленных дефектов при $n = 10$ (1) и $n = 20$ (2) и возможных невыявленных дефектов при $n = 10$ (3) и $n = 20$ (4)

На основе ПВ (7) и (8) получаются следующие зависимости для вычисления точечных оценок показателей дефектов и их дисперсий как для первых моментов распределения [4]:

- для дефекта, проявившегося при n -м испытании:

$$\bar{G} = \frac{n}{n+2}; \quad \sigma_G^2 = \frac{2n}{(n+2)^2(n+3)}; \tag{9}$$

- для возможного дефекта, оставшегося после n испытаний:

$$\bar{G} = \frac{n+1}{n+2}; \quad \sigma_G^2 = \frac{n+1}{(n+2)^2(n+3)}. \tag{10}$$

Из (10) следует, что при ограниченном объеме испытаний n невозможно обеспечить высокие оценки показателей скрытых дефектов $G \rightarrow 1$. Поэтому в реальных условиях ограниченных ресурсов, выделяемых на отработочные испытания, ВБР ТС ограничена из-за возможных скрытых дефектов с показателями $G < 1$.

5. Оценивание ВБР ТС по результатам испытаний с учетом дефектов

На основе изложенной концепции можно обосновать метод оценивания ВБР ТС и их элементов по результатам испытаний с учетом возможных невыявленных (скрытых) дефектов. Если проведено n испытаний ТС или ее элементов и при этом зафиксировано m случайных отказов, то в соответствии с МНО [4] точечная оценка достигнутой ВБР и ее дисперсия при предполагаемом числе $Q_{\text{ост}}$ скрытых дефектов определяется на основе зависимости (4) при оценках входящих в нее параметров

$$\bar{P}_n = \bar{P}_k \bar{G}^{Q_{\text{ост}}}; \quad \sigma_{P_n}^2 = [\bar{P}_n]^2 \left[\frac{\sigma_{P_k}^2}{\bar{P}_k^2} + Q_{\text{ост}} \frac{\sigma_G^2}{\bar{G}^2} \right], \tag{11}$$

где оценки показателей оставшихся дефектов вычисляются по зависимостям (10), а оценка предельной ВБР ТС и ее дисперсия независимо от числа выявленных при испытаниях и устраненных дефектов определяются по формулам [1, 4, 5]

$$\bar{P}_k = \frac{n+1-m}{n+2}; \quad \sigma_{P_k}^2 = \frac{(m+1)(n+1-m)}{(n+2)^2(n+3)}. \tag{12}$$

При выборе числа возможных скрытых дефектов можно учитывать вероятности (2) и (3) с учетом оценок показателей дефектов (10).

Реализации оценок ВБР ТС и их среднеквадратические отклонения (СКО) при предполагаемом ограниченном числе скрытых дефектов в зависимости от числа испытаний n и числа случайных отказов m , полученные по формулам (11)–(12), приведены в таблице.

Из таблицы следует, что с увеличением числа испытаний при ограниченном числе случайных отказов оценки ВБР растут, а их СКО снижаются. Если зафиксирован хотя бы один случайный отказ (причины которого не установлены и доработки не проведены), то оценки достигнутой ВБР заметно снижаются, а их СКО возрастают. Если учитывать возможные скрытые дефекты, то оценки достигнутой ВБР ТС снижаются, а их СКО воз-

Реализации точечных оценок достигнутой ВБР ТС и их СКО

Вариант оценивания		без дефектов		при $Q_{ост} = 1$		при $Q_{ост} = 2$	
n	m	\bar{P}_n	$\sigma_{\bar{P}_n}$	\bar{P}_n	$\sigma_{\bar{P}_n}$	\bar{P}_n	$\sigma_{\bar{P}_n}$
10	0	0,917	0,077	0,840	0,104	0,770	0,119
	1	0,833	0,103	0,764	0,122	0,700	0,132
20	0	0,955	0,043	0,911	0,060	0,870	0,071
	1	0,909	0,060	0,868	0,072	0,828	0,080
50	0	0,981	0,019	0,962	0,026	0,943	0,032
	1	0,962	0,026	0,943	0,032	0,925	0,036
100	0	0,990	0,010	0,980	0,014	0,971	0,017
	1	0,980	0,014	0,971	0,017	0,961	0,019
200	0	0,995	0,0050	0,990	0,0070	0,985	0,0085
	1	0,990	0,0070	0,985	0,0085	0,980	0,0098

растают. При ограниченном объеме испытаний $n \leq 50$ не удастся обеспечить высокое значение оценок ВБР ТС $P > 0,98$ даже при безотказных испытаниях и отсутствии скрытых дефектов. Из этого следует, что для повышения оценок ВБР ТС необходимо выявлять причины каждого отказа и проводить эффективные доработки для его устранения.

Приведенные результаты исследований свидетельствуют, что в соответствии с выдвинутой концепцией для повышения достоверности контроля безотказности ТС необходимо учитывать возможные скрытые дефекты, не выявленные на этапах предыдущих автономных и комплексных испытаний.

6. Следствия изложенной концепции

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

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

2. Возможные дефекты ТС имеют случайную природу проявления, поэтому достоверно выявить и надежно устранить дефекты до использования ТС по назначению можно только на основе серии отработочных испытаний.

3. Вероятности проявления дефектов зависят от условий испытаний или эксплуатации ТС. Поэтому необходимо создавать ужесточенные (экстремальные) условия испытаний ТС.

4. При испытаниях сложных ТС практически не-

возможно создать условия, при которых все возможные действующие факторы были бы экстремальными. В то же время основная доля возможных дефектов принадлежит элементам ТС. Поэтому дефекты целесообразно выявлять на этапах автономных отработочных испытаний элементов ТС, при которых легче создать комплекс действующих экстремальных нагрузок и факторов, в том числе возможно даже 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 для выбора эффективных способов устранения дефектов.

6. При испытаниях и эксплуатации ТС иногда не удастся полностью устранить причину отказа. Поэтому необходимо повышать качество (эффективность) проводимых доработок для надежного устранения выявленных дефектов.

7. Возможные 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 совершенствовать контроль технического состояния ТС перед каждым целевым использованием.

8. Все возможные дефекты ТС и их элементов невозможно выявить и устранить даже после длительного периода отработочных испытаний. Поэтому безотказность ТС, особенно сложных ТС, всегда ограничена (ВБР ТС $P < 1$). По существу, ВБР ТС представляет собой вероятность непроявления всех скрытых дефектов, не выявленных на этапах отработки, имеющих высокие показатели $G \rightarrow 1$.

9. В соответствии с выдвинутой концепцией для повышения достоверности контроля ВБР ТС и их элементов по результатам испытаний необходимо учитывать возможные невыявленные дефекты. Для этого можно использовать методы пп. 4 и 5.

7. Выводы

На основе проведенных исследований получены следующие основные результаты.

1. Изложена концепция динамики безотказности ТС, в соответствии с которой ТС может содержать различные дефекты, проявление которых имеет случайный характер и приводит к отказу ТС. В процессе отработки безотказность ТС повышается благодаря выявлению и устранению дефектов на основе доработок.

2. Показано, что скрытые дефекты, вероятности

непроявления которых соизмеримы с потенциальной ВБР ТС, выявить при ограниченных ресурсах практически не удастся, поэтому контроль ВБР ТС необходимо осуществлять с учетом возможных скрытых дефектов.

3. Приведены зависимости для оценивания достигнутой после отработочных испытаний вероятности безотказной работы ТС с учетом возможных скрытых дефектов. Показано, что скрытые дефекты могут значи-

тельно снизить ВБР ТС, достигнутую при отработочных испытаниях.

4. Изложенная концепция подтверждает актуальность существующих мероприятий по обеспечению и контролю надежности создаваемых и эксплуатируемых ТС. Обоснованы рекомендации по дальнейшему повышению безотказности ТС на основе изложенной концепции.

Литература

1. Волков Л. И., Лукин В. Л., Сухорученков Б. И. Методы статистического контроля надежности технических систем. Юбилейный: ЗАО «ПСТМ», 2008.
2. ГОСТ 21697-87. Комплексы наземные. Основные положения по обеспечению и контролю надежности.
3. ГОСТ 21259-89. Системы и комплексы космические. Порядок задания требований, оценки и контроля надежности.
4. Сухорученков Б. И. Математическая модель и методы оценивания и прогнозирования динамики надежности военно-технических систем при экспериментальной отработке. // Двойные технологии, № 2 (27). СИП РИА, 2004, С. 4-12.
5. Сухорученков Б. И. Анализ малой выборки. Прикладные статистические методы. М.: Вузовская книга, 2010.

Материал поступил в редакцию 19. 04. 2013 г.