

УДК 623.4

Обоснование системы технического контроля при разработке и испытаниях объектов ракетной и космической техники

**Федоровский А. А.^{1,*}, Строгалев В. П.¹,
Владыкин Е. Н.¹**

[*bmstu.sm.artem.f@mail.ru](mailto:bmstu.sm.artem.f@mail.ru)

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Ввиду большой сложности и стоимости объектов ракетной и космической техники (ОРКТ) в процессе разработки и постановки на серийное производство удается провести ограниченное количество испытаний и мероприятий по отработке элементов ОРКТ. Как следствие оценочные модели адекватности функционирования объектов испытаний, оценки их качества и надежности, а также технический контроль приходится формировать при весьма ограниченном количестве полученных данных. Изложена информационная технология обоснования необходимых объемов подтверждающих испытаний надежности ОРКТ и возможностей их сокращения посредством системного учета и моделирования результатов реализаций контрольных операций процедур и процессов технического контроля на различных этапах жизненного цикла систем и ОРКТ. Разработан программный комплекс, реализующий предложенную информационную технологию, который позволит формировать требования для контроля показателей качества и надежности (ПКН) объектов ракетно-космических систем (РКС) при заданном количестве испытаний. Или же, при заданных требованиях к ПКН, формировать программу испытаний и обоснования системы технического контроля с учетом используемых разработчиками РКС технологий проектирования и производства космической техники.

Ключевые слова: сложная система, программа испытаний, системный подход, надежность, качество

Введение

В общем жизненном цикле систем ракетной и космической техники, включающем в себя процессы проектирования, отработки, эксплуатации и серийное производство, испытаниям отводится особая роль. Во многих случаях оказывается, что подавляющая часть общих затрат приходится на проведение испытаний, а это при создании сложных систем выражается в необходимости весьма значительного финансирования. Поэтому обоснование нужного объема испытаний и поиск путей его сокращения имеют важное практическое значение.

В государственных и международных стандартах качества сформулированы принципы, согласно которым оценочные модели качества, в рамках технического контроля, предлагается формировать только на основе объективных данных путем сравнения полученных показателей с установленными (нормативными) требованиями.

Большая стоимость изделий и малое время, отводимое на создание и отработку, позволяют провести лишь ограниченное количество испытаний. В этом случае, а также при полной или частичной невозможности реализации условий функционирования (в процессе испытаний) образца военной техники используют программные средства с привлечением полученных ранее результатов теоретических и экспериментальных работ (априорной информации) для получения результатов моделирования процессов функционирования, как самого образца, так и его отдельных составных частей [1].

Привлечение априорной информации для планирования и оценки испытаний ракетно-космических систем (РКС) связано с немалыми трудностями.

Во-первых, массив исходных данных для РКС огромен и неоднороден. Проблемой здесь является сведение всей информации воедино, не говоря уже о ее анализе.

Во-вторых, принимая эту информацию, необходимо учитывать особенности каждого контролируемого процесса и этапа жизненного цикла, динамику развития разрабатываемого, создаваемого и эксплуатируемого образца.

В-третьих, речь идет не о простом сложении такой информации, а о творческом рассмотрении и анализе информации с системных позиций на основе единого методологического подхода, позволяющего с помощью иерархически и итеративно согласованного комплекса методов, методик, алгоритмов и программ формирования, отработки и анализа данных планировать и принимать обоснованные решения по результатам испытаний о качестве и надежности РКС.

Для решения данной проблемы рекомендуется использовать статистические методы контроля и управления качеством [2], которые могут помочь при измерении, анализе, интерпретации и моделировании изменчивости исследуемых явлений и процессов даже при относительно ограниченном количестве данных.

Однако применение таких методов распространяется на статистический приемочный контроль по выборкам из последовательных партий единиц продукции (изделий). А это ограничивает использование этих методов для испытаний единичных образцов сложных систем и объектов ракетно-космической техники.

В настоящее время показатели надежности систем ракетного и ствольного оружия определяются методами поэлементного анализа, осуществляемые применением расчетных схем типа одномерных и многомерных моделей «непревышения». Эти модели хорошо изучены и широко освещены в литературе [3], но при анализе надежности РКС, для решения сформулированной проблемы наибольший интерес представляет работа [4], в которой рассматриваются методы мониторинга динамики вероятности безотказной работы РКС для различных случаев, а также методы планирования объемов испытаний.

В данной работе авторы предлагают к рассмотрению идеализированную структурную схему надежности сложной системы с обезличиванием (т. е. с усреднением по показателям надежности) элементов, что позволяет для таких систем подтверждать достаточно высокие требования к надежности без анализа возникающих проблемных вопросов обеспечения качества и надежности РКС по результатам испытаний и технического контроля производственных процессов.

Однако, в настоящее время, наметилась тенденция невыполнения полного цикла испытаний опытных образцов, сокращения процедур контроля и регулирования производственных процессов, а также использования методов анализа характера и последствий отказов при испытаниях.

Между тем в национальных и международных стандартах качества при реализации «системного» и «процессного» подходов предлагается осуществлять принятие решений, основанное на фактах, т. е. на основании анализа данных и информации.

Если посмотреть на статистику отказов, аварий и катастроф в авиации и космической техники за 40 лет [5], с 1961 по 2000 г. включительно, то можно наблюдать тенденцию отказов вполне конкретных элементов, в том числе ракетных двигателей различных ступеней. Однако в последнее время отказы и дефекты имеют место в разных узлах РКС. Это означает, что проблемы на производстве имеют системный характер.

Изучая информацию по таким современным изделиям, как «Булава» и «Протон-М», можно сделать вывод, что в последнее время большое количество отказов возникает вследствие недостаточного контроля выполнения работ при сборке и изготовлении. Насколько известно, основными причинами аварийных пусков были не конструктивные, а мелкие производственные дефекты, например, отказы пиропатронов, элементов бортового электропитания, а также нарушение технологической дисциплины. Поэтому без резкого усиления контроля производственных процессов достаточно сложно прогнозировать результаты последующих испытаний.

Совокупность перечисленных факторов ставит проблему снижения качества военной продукции в ряд важнейших и подлежащих незамедлительному решению.

1. Метод вероятностно-статистического анализа

Существующие методы оценки и контроля надежности (один из основных показателей качества), как правило, не обеспечивают возможность совместного решения следующих задач:

- планирования испытаний РКС;
- обоснования состава контролируемых характеристик и контрольных процедур процессов жизненного цикла;
- подтверждения требований по надежности РКС по результатам испытаний на различных этапах полного жизненного цикла.

Поэтому в рамках рассматриваемой проблемы предполагается использовать метод вероятностно-статистического анализа (МВСА) работоспособности стохастических

систем [6, 7], обеспечивающий решение задачи планирования испытаний, оценки и контроля надежности технических систем при испытаниях с использованием априорной расчетно-экспериментальной информации.

Особенностью метода является реализация принципа, согласно которому объемы испытаний, необходимые для подтверждения требуемого уровня надежности, находятся в обратной зависимости от различного рода конструктивных, функциональных, структурных запасов системы, уровня информационно-измерительной базы и полноты располагаемой информации.

Схема информационной технологии подтверждения требований показателей качества и надежности (ПКН) систем и объектов представлена на рис 1.

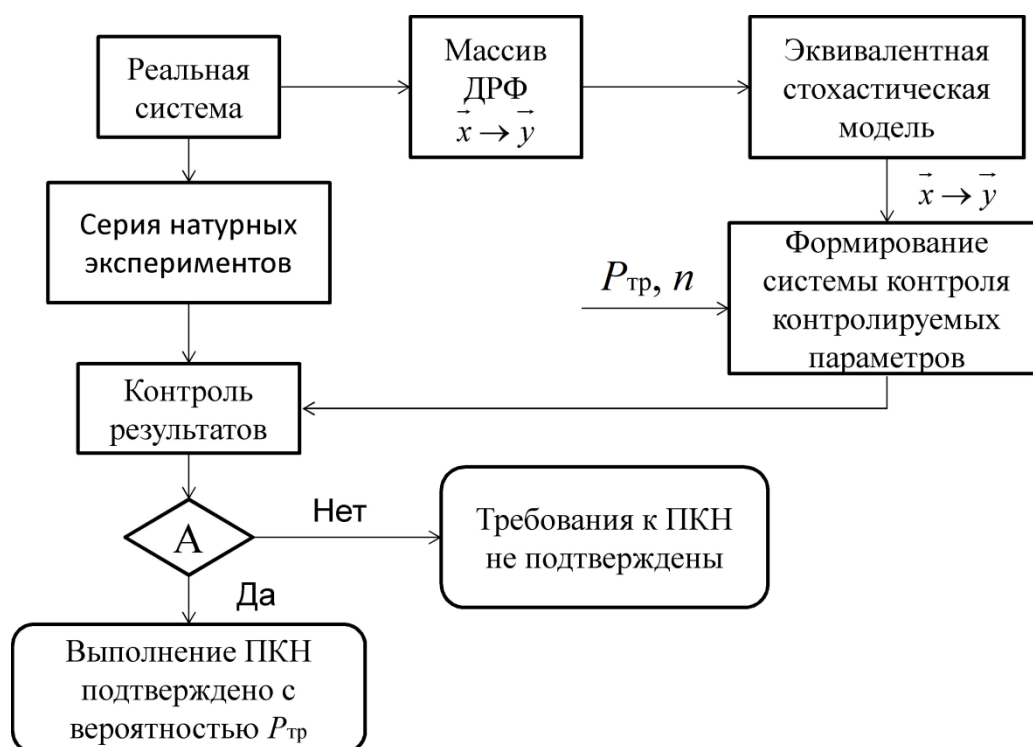


Рис. 1. Схема информационной технологии подтверждения ПКН: ДРФ - данные реализации функционирования; P_{tr} - требуемая вероятность выполнения требований; n - количество испытаний.

Сущность предлагаемого подхода состоит в том, что реализация функционирования сложной системы и/или ее составных частей фиксируется в виде соответствия $\vec{x} \rightarrow \vec{y}$ компонент вектора входных и выходных параметров фиксируемых на предшествующих этапах жизненного цикла сложной системы и/или ее составных частей. Для генерации реализации $\vec{x} \rightarrow \vec{y}$ строится эквивалентная стохастическая модель. Далее, исходя из требуемой вероятности выполнения ПКН P_{tr} и количества натурных испытаний n , формируется система контроля результатов, которая определяется перечнем ($i = \overline{1, N}$) и диапазонами допустимых значений входных и выходных параметров, подлежащих контролю в ходе подтверждающих испытаний, т. е. условиями $a_i \leq z_i \leq b_i$, где a_i , b_i –

минимальное и максимальное допустимые значения контролируемых параметров; z_i - значение контролируемого параметра. При выполнении всех неравенств исход испытаний признается положительным (условие А на рис. 1).

Достоинством предлагаемого подхода является инвариантность внутреннему строению и даже природе испытываемой сложной системы, что дает возможность создать универсальное для всех систем и объектов РКС методическое, математическое и программное обеспечение подтверждающих испытаний.

Данный методический подход к организации и контролю комплексных испытаний РКС позволяет обосновывать и включать в систему такие контрольные нормативы, при помощи которых с общей для всей совокупности ТТТ вероятностью $P_{тр}$ достигается заданный уровень качества и надежности.

2. Метод идентификации сложных систем и объектов

Для обеспечения комплексного обоснования состава контролируемых параметров и показателей систем и объектов РКС в целом используется универсальная схема подтверждения требуемой вероятности выполнения ТТТ к системе РКС или ее составной части.

Этот метод - метод идентификации сложных систем и объектов (МИСО) включает методологические, математические и технологические аспекты оценки степени соответствия возможностей и свойств реальных сложных систем их информационным образам на основе наблюдения результатов функционирования этих систем без изучения внутренней структуры.

Методологическую основу МИСО составляет постулат эквивалентности, который утверждает, что любая реальная сложная система может быть заменена по результатам функционирования некоторой информационной стохастической моделью ИСМ, которая строится на основе априорных данных, полученных при наблюдении за предшествующим функционированием идентифицируемого объекта сложной системы.

Многokrатно проигрывая существующие ситуации, можно получить распределение математических вероятностей, которое дает возможность замены реальной сложной системы эквивалентной ей по результатам ИСМ, имитирующей вероятностно-детерминированное соответствие входных и выходных параметров сложной системы [8].

По определению информационный образ сложной системы полностью описывается двумя группами критериев для входных и выходных параметров сложной системы: $\vec{x}_\mu \in \vec{Q}_\mu$, $\mu = \overline{1, M}$ - условие А; $\vec{y}_\mu \in \vec{D}_\mu$, $\mu = \overline{1, M}$ - условие В, где $\vec{x}_\mu$ ($\vec{y}_\mu$) – вектор входных (выходных) параметров; $\vec{Q}_\mu$ ($\vec{D}_\mu$) – вектор входной (выходной) информации μ -го диапазона, описываемый допустимыми значениями компонент вектора $\vec{x}_\mu$ ($\vec{y}_\mu$); μ – номер диапазона значений параметров, соответствующих определенному варианту

внешних условий по выбранному режиму функционирования сложной системы; M – заданное число вариантов среды.

В рамках МИСО решение указанных проблем достигается за счет декомпозиции вероятностного критерия $P(B)$ с использованием понятия весовых коэффициентов [3, 7] и разработки математического обеспечения для их нахождения.

Метод декомпозиции функции многих переменных, принципиальная возможность которой доказана А. Н. Колмогоровым, позволяет при определенных допущениях построить функцию надежности и/или качества (ФНК) $P = P(P_i')$ практически любой

системы в виде соотношения: $P = P(P_i') = P(B) = P_0 \cdot \prod_{i=1}^N (1 - q_i \eta_i)$, где P_i' – аргумент

функции, определяющий место и роль i -го элемента в составе системы; $B = \{\bar{y}_L \in D_L\}$ –

событие, означающее, что система находится в работоспособном состоянии

(функционирует успешно), т. е. все L – количество компонент вектора выходных

характеристик системы $\bar{y}_L$ находятся в области допустимых значений D_L ; a_i, b_i –

фиксированные числа (установленные контрольные нормативы) для i -го элемента

системы; требования к N входным показателям (также, как и к выходным) имеют характер

ограничений (в виде допусков или контрольных нормативов) $a_i \leq x_i \leq b_i$; A_i ($\bar{A}_i$) –

событие, заключающееся в успехе (отказе) функционирования i -го элемента системы,

$A_i = \{x_i \in [a_i, b_i]\}$; $\bar{A}_i = \{x_i \notin [a_i, b_i]\}$; $q_i = P(\bar{A}_i)$ – вероятность отказа i -го элемента системы;

$P_0 = P(B / \bigcap_{i=1}^N A_i)$ – вероятность выполнения всех требований для системы в целом

(выходных показателей) при условии, что требования для всех N входных показателей

также выполняются; $\eta_i = 1 - \frac{P(B / \bar{A}_i)}{P_0}$ – коэффициент значимости i -го элемента.

Коэффициент η_i характеризует «функциональную избыточность» системы (объекта)

по i -му элементу. Так, равенство $\eta_i = 1$ соответствует случаю, когда невыполнение

требования (несоответствия) по i -му элементу однозначно влечет за собой невыполнение

одного или нескольких требований по выходным показателям (отказ системы). Если i -е

несоответствие по входному показателю никак не влияет на событие B или

противоположное ему событие $\bar{B}$, то $\eta_i = 0$. Технология построения анализа ФНК

базируется на обработке массива исходной статистической базы данных ИСМ,

структурированных в форме реализаций соответствия $[\bar{x}_N]_j \rightarrow [\bar{y}_L]_j$, $j = \overline{1, m}$, где m –

число таких реализаций.

Такой подход позволяет обеспечить целостность и единство отношений и связей

между вероятностными показателями входных и выходных ПКН за счет введения

расчетных системообразующих показателей – весовых коэффициентов.

Следует отметить случай, когда в оцениваемом (анализируемом) объекте возникают особые системообразующие связи и отношения, при котором $\eta_i < 0$. При этом несоответствии по контрольному показателю (событие $\bar{A}_i$) может оказывать даже благоприятное воздействие на успешность (безотказность) функционирования объекта (событие B). Устранить это явление можно переназначением «неправильного» контрольного норматива (устранение «эффекта перепутывания допусков»), чтобы расчетное η_i приняло положительное значение. В случае, если такое переназначение по разным причинам нежелательно (или невозможно), вправе принять допущение $\eta_i = 0$.

3. Построение системы контроля

При решении задачи планирования подтверждающих испытаний с использованием ФНК обосновывается и формируется состав контролируемых элементов (параметров контролируемых процессов), их значимость, а также условия приемки с выработкой мероприятий, направленных на устранение несоответствий по входным (выходным) параметрам и повышение качества рассматриваемой системы.

В [6] показано, что при заданных требованиях к ПКН в виде $P \geq P_{\text{тр}}$, допустимом риске заказчика, требуемом уровне доверительной вероятности γ , применении c_0 – процедуры контроля [3] к рассматриваемым характеристикам и сформированной ФНК системы условие приемки для такой системы имеет вид:

$$n \geq n_0 = \max_{0 \leq i \leq N} n_{0i};$$

$$n_i \geq n_{0i} = \frac{\ln(1-\gamma)}{\ln(1 - \frac{1-P_{\text{тр}}/P_0}{\eta_i})}, \text{ для } 1 - P_{\text{тр}}/P_0 \leq \eta_i \leq 1;$$

$$n_{0i} = 0, \text{ для } \eta_i \leq 1 - P_{\text{тр}}/P_0,$$

где n_0 , n_{0i} – минимально необходимые объемы безотказных испытаний системы и измерений каждого i -го элемента в составе системы.

Выполнение условий приемки реализуется N -контрольными процедурами путем сопоставления экспериментальных значений x_i , $i = \overline{1, N}$ с нормативами.

Каждая такая процедура определяется:

- контрольным (расчетным) нормативом для x_i в виде двух границ $[a_i, b_i]$ (двухсторонний норматив), или одной из границ a_i или b_i (односторонний норматив);
- объемом n_i серии измерений для x_i в n -испытаниях системы;
- критерием успешного выполнения процедуры контроля:

$$a_i \leq x_i^{(j)} \leq b_i, j = \overline{1, n_i} - \text{для двухстороннего норматива;}$$

$$\left. \begin{array}{l} x_i^{(j)} \geq a_i, j = \overline{1, n_i} \\ x_i^{(j)} \leq b_i, j = \overline{1, n_i} \end{array} \right\} - \text{для односторонних нормативов.}$$

При выполнении одного из этих условий во всех $n_\Sigma = \sum_{i=1}^N n_i$ контрольных процедурах принимается положительное заключение по результатам идентификации: система идентифицирована в результате проведения n подтверждающих контрольных испытаний, т. е. требуемый уровень $P_{\text{тр}}$ показателя P подтвержден.

Если зафиксирована хотя бы одна отказная серия n_i , т. е. серия измерений x_i , в которой имеет место один и более случаев невыполнения упомянутых условий, то принимается отрицательное заключение по результатам контрольных испытаний, что, однако, еще не означает невыполнения требования $P \geq P_{\text{тр}}$. В осуществляемой процедуре принятия решений для этого случая риск разработчика (поставщика) не оговаривается, а его интересы защищены возможностью диагностирования причин возникновения отказных серий, проведения переназначения контрольных нормативов (a_i, b_i) и повторного анализа результатов испытаний или назначения повторных испытаний. Для расширения возможностей диагностирования предусмотрен вариант идентификации, совмещающий процедуру проверки условий и процедуру сопоставления экспериментальных значений y_L (если это практически возможно) с D_L при проведении n испытаний.

Результаты контроля и сравнения с нормативами входных и выходных характеристик в ситуационном анализе представлены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты испытаний в ситуационном анализе

Исход испытаний	Входные характеристики $x_1, \dots, x_N$	Выходные характеристики $y_1, \dots, y_L$
Успешный	+	+
Неуспешный	–	+
	–	–
	+	–

«+» – соответствие значения характеристики заданному нормативу;

«–» – несоответствие значения характеристики заданному нормативу.

При неуспешном исходе полученная в процессе испытаний информация дает основу для диагностики причин такого исхода и выработку рекомендаций по доработке объекта испытаний и/или совершенствованию элементов метода решения поставленной задачи, которые могут включать:

- корректировку программы испытаний и проведение дополнительных контрольных испытаний с измененными нормативами входных параметров;
- ужесточение (уменьшение диапазона изменения) параметров законов распределения (требований к стабильности) тех входных параметров, по которым не выполнены нормативы;

- смещение номинальных значений входных параметров с отрицательными коэффициентами значимости ($\eta_i < 0$), обеспечивающее включение их в число рассматриваемых параметров;
- смягчение требований к объекту испытания (к выходным параметрам) до уровня, соответствующего заданной степени выполнения требований $P_{тр}$;
- изменение состава источников априорной информации и/или переназначение контрольных нормативов с корректировкой математической модели.

Заключение

Предложенный подход удобно использовать для обоснования и построения системы технического контроля, которая по определению отраслевого положения РК-98-КТ о создании, производстве и эксплуатации космической техники представляет собой «комплекс методов и планов контроля, правил и критериев приемки изделий, контрольных операций, определяющих объекты, объем и режимы контроля, последовательность его проведения как неотъемлемую часть технологических процессов изготовления».

Программный комплекс, реализующий предложенную информационную технологию, позволит формировать требования для контроля показателей надежности РКС при заданном количестве испытаний или же при заданных требованиях к показателям надежности формировать программу испытаний с учетом функциональной избыточности элементов системы. При невыполнении требований по надежности сложной системы полученная в процессе испытаний информация дает основу для диагностики причин такого исхода, выработки рекомендаций по доработке сложной системы и/или совершенствованию элементов метода решения программного комплекса.

Стоит отметить, что представленный программный комплекс можно использовать в смежных областях разработки объектов вооружения.

Список литературы

1. ГОСТ Р 15.201-2000. Система разработки и постановки продукции на производство. Продукция производственно-технического назначения. Порядок разработки и постановки продукции на производство. М.: Изд-во стандартов, 2001.
2. ГОСТ Р 50779.11–2000. Статистические методы. Статистическое управление качеством. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2008. 37 с.
3. Судаков Р.С. Испытание технических систем: Выбор объемов и продолжительности. М.: Машиностроение, 1988. 271 с.
4. Меншиков В.А., Сухорученков Б.И. Методы мониторинга надежности ракетно-космических систем. М.: НИИ КС, 2006. 474 с. 6. Menshikov V.A., Suhoruchenkov B.I. Metody monitoringa nadezhnosti raketno-kosmicheskikh system (Space-rocket systems reliability monitoring methods), Moscow, NII KS, 2006, 474 p

5. Харченко В.С., Склад В.В., Тарасюк О.М. Безопасность аэрокосмической техники и надежность компьютерных систем // Авиационно-космическая техника и технология. 2004. № 1(9). С. 66-80.
6. Судаков Р.С., Владыкин Е.Н. К вопросу о совместном рассмотрении методов расчета надежности технических систем на этапе проектирования и методов теории испытаний // Надежность и контроль качества. 1980. № 1.
7. Животкевич И.Н., Новиков Б.К., Владыкин Е.Н. Оценка и прогноз результативности и эффективности процессов СМК и СМК в целом с использованием системной технологии (продолжение) // Вестник военного регистра. 2004. № 3 (39). С. 30-39.
8. Строгалев В.П., Толкачева И.О. Имитационное моделирование: учеб. пособие. 2-е изд., испр. и доп. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015. 295 с.

Justification of Technical System Control in Developing and Testing Objects of Missile and Space Technology

A.A. Fedorovskiy^{1,*}, V.P. Strogalev¹,
E.N. Vladykin¹

* bmstu.sm.artem.f@mail.ru

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Keywords: complex system, test program, systems approach, reliability, quality

Tests in general lifecycle of missile and space technology, play a special role. The high cost of such products and a little time for creation and refinement, allow only a limited number of tests. Justification of the appropriate number of tests and finding the ways to reduce it are important from the practical point of view.

When the appropriate number of field tests is impossible to implement, as well as if full or partial realization of the sample operation conditions is impossible the authors propose to use software with the involvement of previously obtained aprioristic information to have the modeling results of the functioning sample or its parts, according to the reliability and quality standards.

Involvement of statistical methods for systems and objects of the missile and space equipment is limited to the single number of the carried-out tests. Currently used models and methods for systems of missile and barreled weapon do not allow us to conduct analysis and provide guidance on emerging issues of concern to ensure the quality and reliability of objects of the missile and space equipment by results of tests.

The method of probabilistic and statistical analysis of the stochastic system operability is supposed to be used to solve a problem of the planning tests, assessment and control of reliability of technical systems at tests using aprioristic calculated and experimental information. This method makes it possible to relate the number of tests, required to prove the desirable level of reliability, to different types of constructional, functional, structural reserves of the system, as well as the level of information-and-measuring base and the completeness of available information.

Thus, the structure of controlled elements, their importance, and acceptance conditions including elaboration of actions and recommendations to eliminate discrepancies in controlled parameters and improve quality of the considered system are justified and formed when solving a problem of the planning tests.

References

1. GOST R 15.201-2000. Sistema razrabotki i postanovki produktsii na proizvodstvo. Produktsiya proizvodstvenno-tekhnicheskogo naznacheniya. Poryadok razrabotki i postanovki produktsii na proizvodstvo [State Standard of RF 15.201-2000. System of product development and launching into manufacture. Products of industrial and technical designation. Procedure of product development and launching into manufacture]. Moscow, Standards Publishing House, 2001. (in Russian).
2. GOST R 50779.11-2000. Statisticheskie metody. Statisticheskoe upravlenie kachestvom. Terminy i opredeleniya [State Standard of RF 50779.11-2000. Statistical methods. Statistical quality control. Terms and definitions]. Moscow, Standartinform Publ., 2008. 37p. (in Russian).
3. Sudakov R.S. *Ispytanie tekhnicheskikh sistem: Vybory ob'emov i prodolzhitel'nosti* [Technical Systems Testing: Selection of volume and duration]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1988. 271 p. (in Russian).
4. Men'shikov V.A., Sukhoruchenkov B.I. *Metody monitoringa nadezhnosti raketno-kosmicheskikh sistem* [Space-rocket systems reliability monitoring methods]. Moscow, NII KS Publ., 2006. 474 p. (in Russian).
5. Kharchenko V.S., Sklyar V.V., Tarasyuk O.M. Aerospace engineering safety and reliability of computer systems. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*, 2004, no. 1 (9), pp. 66-80. (in Russian).
6. Sudakov R.S., Vladykin E.N. On the issue of co-pending methods for calculating the reliability of technical systems during the design and methods of the theory test. *Nadezhnost' i kontrol' kachestva*, 1980, no. 1. (in Russian).
7. Zhivotkevich I.N., Novikov B.K., Vladykin E.N. Assessment and forecast the effectiveness and efficiency of QMS processes and QMS as a whole using the system technology (continued). *Vestnik voennogo registra*, 2004, no. 3 (39), pp. 30-39. (in Russian).
8. Strogalev V.P., Tolkacheva I.O. *Imitatsionnoe modelirovanie* [Simulation modeling]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2015. 295 p. (in Russian).