

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ КОНТРОЛЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

© 2024

- А. А. Золотов** доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Космические системы и ракетостроение»; Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет); alexandrzolotov41@mail.ru
- В. В. Родченко** доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Управление эксплуатацией ракетно-космических систем»; Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет); rodchenko47@mail.ru
- Е. В. Гусев** кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление эксплуатацией ракетно-космических систем»; Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет); csg-gus@mail.ru
- И. А. Карягин** аспирант кафедры «Управление эксплуатацией ракетно-космических систем»; Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет); jaonto@gmail.com

Рассматривается задача контроля работоспособности технических систем, соответствующая этапу выходного контроля при производстве изделия, а также стадии проверки изделия перед его применением. На основе обобщения и развития существующих подходов разработаны модели и методы контроля работоспособности сложных технических систем, предложены модели прогнозирования параметров их контроля. Разработаны методы оптимизации числа испытаний агрегатов технических систем при проведении контроля их работоспособности. Предложены методы оценки оптимального уровня суммарного процента брака. Работоспособность предлагаемых подходов проиллюстрирована на конкретном численном примере. Методы и модели, изложенные в статье, могут быть полезны для инженерно-технических работников КБ, НИИ, научно-производственных объединений и предприятий при обеспечении безотказности изделий и технических систем.

Надёжность; экспериментальная отработка; число испытаний; контроль работоспособности

Цитирование: Золотов А.А., Родченко В.В., Гусев Е.В., Карягин И.А. Прогнозирование параметров контроля работоспособности сложных технических систем // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2024. Т. 23, № 2. С. 109-120. DOI: 10.18287/2541-7533-2024-23-2-109-120

Постановка задачи

При проведении контроля работоспособность изделия определяется по факту удовлетворения требований, предъявляемых к его надежности. Контроль сложных технических систем (ТС) должен охватывать все уровни, начиная от отдельных элементов и подсистем и заканчивая контролем всего изделия. В настоящей работе рассматривается задача контроля работоспособности ТС, соответствующая этапу выходного контроля при производстве изделия, а также на стадии проверки изделия перед его применением.

Решение этой задачи заключается в определении объема контрольных испытаний для различных агрегатов ТС. При этом предполагается, что известны объемы испытаний, проведённые на предшествующих этапах экспериментальной отработки, обеспе-

чивающие требуемые уровни надёжности этих агрегатов. Для решения поставленной задачи требуется конкретизировать выражение для оценки суммарного риска принятия браковочного изделия.

В дальнейшем рассматривается приближённое выражение для оценки суммарного риска β_Σ принятия бракованного изделия при контроле отдельных агрегатов изделия β_i :

$$\beta_\Sigma \approx \sum_{i=1}^m \beta_i,$$

где β_i – величина риска принятия ошибочных решений при контроле отдельных агрегатов изделия; m – число агрегатов в составе изделия.

Оценка β_Σ является гарантированной, так как оценка суммарного риска производится без учёта проверки изделия в целом, проведение которой приводит к уменьшению величины β_Σ [1].

Оценка риска принятия ошибочных решений для агрегатов изделия

Оценивая риск принятия ошибочных решений при контроле отдельных агрегатов β_i , будем считать, что для каждого агрегата можно оценить математическое ожидание коэффициента запаса, обеспечивающего удовлетворение заданных требований по надёжности. Под коэффициентом запаса (η) по рассматриваемому параметру будем понимать отношение действующих и допустимых значений параметра $\eta = \frac{x_{\text{доп}}}{x_d}$,

где x_d , $x_{\text{доп}}$ – соответственно действующее и допустимое значение параметра.

В случае нормального закона распределения параметров работоспособности математическое ожидание коэффициента параметрического запаса удовлетворяет соотношению [2]:

$$m_{\eta,i} = \frac{\eta_i}{\left(1 - \frac{t_{\gamma,i} k_{V,i}}{\sqrt{n_i}}\right)}, \quad (1)$$

где $m_{\eta,i}$ – оценка математического ожидания коэффициента запаса i -го агрегата, соответствующая надёжности, подтверждённой на этапе экспериментальной отработки;

$\eta_i = \frac{1}{1 - \arg F^* \{h_i\} k_{V,i}}$ – оценка коэффициента запаса, соответствующая заданной надёжности агрегата; $k_{V,i}$ – коэффициент вариации коэффициента запаса; n_i – число испытаний, проведённых на этапе экспериментальной отработки; $t_{\gamma,i}$ – аргумент функции нормированного нормального распределения, соответствующий принятому уровню доверительной вероятности γ ; h_i – заданный уровень надёжности i -го агрегата.

Таким образом, задача прогнозирования заключается в определении объёма контрольных испытаний при известных значениях математического ожидания коэффициента запаса агрегатов.

Для оценки риска принятия ошибочных решений при контроле отдельных агрегатов изделия β_i рассмотрим области отработки отдельного агрегата, представленные на рис. 1 [2].

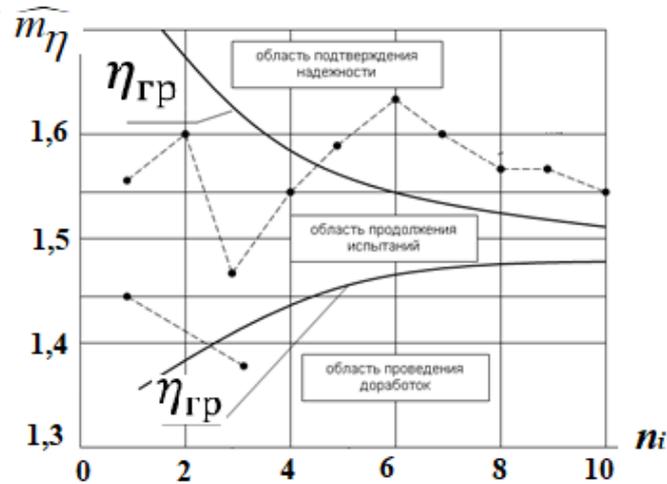


Рис. 1. Области принятия решений по результатам испытаний

Согласно результатам, полученным в работах [2; 3], если значение точечной оценки математического ожидания коэффициента запаса \hat{m}_η лежит в области подтверждения надёжности, то заданные требования к надёжности удовлетворяются с вероятностью γ . Следовательно, с вероятностью $\beta = 1 - \gamma$ надёжность может быть ниже требуемой. Таким образом, β характеризует вероятность принятия изделия, не удовлетворяющего заданным требованиям по надёжности, то есть вероятность принятия брака. Для оценки вероятности брака β требуется оценить величину доверительной вероятности γ . С этой целью воспользуемся соотношением (1), записанным для параметров контроля. Разрешая это соотношение относительно аргумента функции нормированного нормального распределения $t_{\gamma,i}$, соответствующего уровню доверительной вероятности γ_i , получим

$$t_{\gamma,i} = \frac{\sqrt{n_i}}{k_{V,i} m_{\eta,i}} \left(m_{\eta,i} - \frac{1}{1 - k_{V,i} t_{h,i}} \right), \quad (2)$$

где $t_{h,i}$ – аргумент функции нормированного нормального распределения, соответствующий уровню надёжности h_i ; $k_{V,i}$ – коэффициент вариации коэффициента запаса.

Отсюда, учитывая, что $\beta = 1 - \gamma$, получим выражение

$$\beta_i = 1 - F^* \{ t_{\gamma,i} \}. \quad (3)$$

Оптимизация рисков принятия ошибочных решений и объёмов испытаний отдельных агрегатов изделия

Как видно из соотношений (2) и (3), риск принятия браковочного агрегата зависит от характеристик надёжности отдельного агрегата и объёма его контрольных испытаний.

Рассмотрим задачу оптимального распределения объёма испытаний для различных агрегатов, обеспечивающих заданные требования по уровню суммарного риска (не превышающего суммы рисков отдельных агрегатов, входящих в состав изделия) при минимальных затратах на проведение контроля [4].

Общие затраты можно представить в виде:

$$C(n_i) = \sum_{i=1}^m C_i n_i + C_{ПП}, \quad (4)$$

где C_i – затраты на проведение одного испытания i -го агрегата; $C_{ПП}$ – прочие затраты; m – число агрегатов в составе изделия.

Как было показано выше, величину суммарного риска β_Σ без учёта проверки агрегата в целом можно оценить по соотношению:

$$\beta_\Sigma \approx \sum_{i=1}^m \beta_i = \sum_{i=1}^m F^* \{ -t_{\gamma,i} \},$$

где $t_{\gamma,i} = d_i \sqrt{n_i}$; $d_i = \frac{m_{\eta,i}}{k_{V,i} m_{\eta,i}} \frac{1}{1 - k_{V,i} t_{h,i}}$; $t_{h,i} = \arg F^* \{ h_i \}$; h_i – заданные требования к уровню надёжности i -го агрегата.

Задача оптимизации параметров контроля решалась методом Лагранжа. В рассматриваемом случае функция Лагранжа примет вид:

$$L = \sum_{i=1}^m C_i n_i + \lambda (\beta_\Sigma - \beta_{3AD}), \quad (5)$$

где C_i – затраты на проведение одного испытания i -го агрегата; λ – неопределённый множитель Лагранжа; β_{3AD} – заданный уровень суммарного риска.

Оптимальные объёмы испытаний удовлетворяют системе алгебраических уравнений [5; 6]:

$$\frac{\partial L}{\partial n_i} = C_i - \lambda \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t_{\gamma,i}^2}{2}} \frac{d_i}{\sqrt{n_i}} = 0. \quad (6)$$

Разрешая полученное соотношение относительно $\sqrt{n_i}$, приходим к искомому соотношению:

$$\sqrt{n_i(\lambda)} = \left[\frac{\lambda}{C_i} \frac{d_i}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t_{\gamma,i}^2}{2}} \right]. \quad (7)$$

Оптимальные параметры выходного контроля соответствуют значению λ^* , для которого выполняется условие:

$$\beta_{3AD} \approx \sum_{i=1}^m \beta(n_i).$$

Сформулированная задача может быть решена методом перебора по параметру λ , в результате чего получим значение λ_j . Для найденного значения λ_j оценивается оптимальный объём испытаний по каждому агрегату:

$$\sqrt{n_i} = \left\{ \frac{\lambda_j}{C_i} \frac{m_{\eta,i} - \frac{1}{1 - k_{v,i} t_{h,i}}}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t_{\gamma,i}^2}{2}} \right\}. \quad (8)$$

Параметр $t_{\gamma,i}$ находится методом последовательных приближений по соотношениям:

$$t_{\gamma,i} = d_i \sqrt{n_i(\lambda)} = \left[\frac{\lambda}{C_i} \frac{d_i^2}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t_{\gamma,i}^2}{2}} \right], \quad (9)$$

где $d_i = \frac{m_{\eta,i} - \frac{1}{1 - k_{v,i} t_{h,i}}}{k_{v,i} m_{\eta,i}}$.

Программа в Mathcad и результаты расчёта $t_{\gamma,i}$, обозначенные в программе как U_i , для трёх агрегатов, входящих в состав изделия, представлены на рис. 2. При написании программы были приняты следующие обозначения: $\eta_i = m_{\eta,i}$; $t_i = t_{h,i}$; $v = k_{v,i}$.

Зависимость $\beta(\lambda)$ представлена на рис. 3. На графиках рис. 3 введены следующие обозначения: $y(\lambda)$ – аппроксимирующая кривая; $\beta(\lambda)$ – расчётная кривая; $\beta_{3AD} = 0,01$ – заданный уровень риска для изделия в целом.

Как видно из графика аппроксимирующей кривой, требуемое значение $\beta_{3AD} = 0,01$ удовлетворяется при значении $\lambda = 20,5$. Для найденного значения λ риски принятия ошибочных решений оцениваются по соотношениям [7; 8]:

$$\beta_i = \left[1 - \int_{-\infty}^{U_i} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}} dx \right], \quad (10)$$

где $U_i = t_{\gamma,i}$.

$$\begin{aligned}
 &U := \left[\begin{array}{l} \text{for } i \in 0..2 \\ \quad \text{for } j \in 0 \\ \quad \quad U_{i,0} \leftarrow 2.7 \\ \text{for } i \in 0..2 \\ \quad \text{for } j \in 0..6 \\ \quad \quad U_{i,j+1} \leftarrow \left[2 \cdot \ln \frac{\lambda}{c_i} \cdot \frac{\left[\frac{\left(\eta_i - \frac{1}{1 - v \cdot t_i} \right)^2}{(v \cdot \eta_i)} \right]}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \right] - 2 \cdot \ln(U_{i,j}) \end{array} \right]^{0.5} \\
 &U = \begin{pmatrix} 2.7 & 3.359 & 3.293 & 3.299 & 3.299 & 3.299 & 3.299 & 3.299 \\ 2.7 & 2.852 & 2.832 & 2.835 & 2.834 & 2.834 & 2.834 & 2.834 \\ 2.7 & 2.379 & 2.432 & 2.423 & 2.424 & 2.424 & 2.424 & 2.424 \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$

Рис. 2. Программа проведения последовательных приближений и результаты расчёта

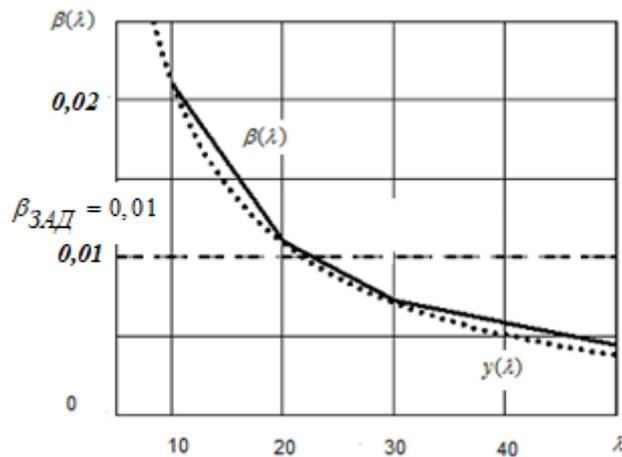


Рис. 3. Изменения суммарного риска по параметру λ

Потребные объёмы испытаний рассчитываются по соотношению:

$$n_i = \left[\frac{U_i}{\frac{\left(\eta_i - \frac{1}{1 - v_i t_i} \right)}{v_i \eta_i}} \right]^2, \tag{11}$$

где $k_{v,i} = v_i$ (принято в Mathcad).

Оптимизация суммарной вероятности брака

Полученные результаты позволяют оценивать оптимальную суммарную вероятность брака для всего изделия. Очевидно, оптимальное значение β_Σ должно обеспечивать минимум суммарных затрат:

$$C_\Sigma(\lambda) = \sum_{i=1}^m C_i k_i(\lambda) + C_{\text{ущ}} \beta_\Sigma(\lambda), \quad (12)$$

где $C_{\text{ущ}}$ – величина ущерба, обусловленного ошибкой контроля.

Задача решается методом перебора значений λ и графической оценкой оптимального уровня множителя Лагранжа, соответствующего минимальным затратам [9]. Характер изменения суммарных затрат при $C_{\text{ущ}} = 100$ усл. ед. и $C_{\text{ущ}} = 10$ усл. ед. представлен на рис. 4 и 5 соответственно.

В варианте $C_{\text{ущ}} = 10$ усл. ед. (рис. 5) минимум затрат достигается при значении $\lambda = 5$, которому соответствует величина суммарного риска, равная $\beta_\Sigma = 0,04$. Последовательность проведения расчётов по предлагаемому подходу представлена ниже в алгоритме прогнозирования работоспособности изделия по результатам контроля его агрегатов.

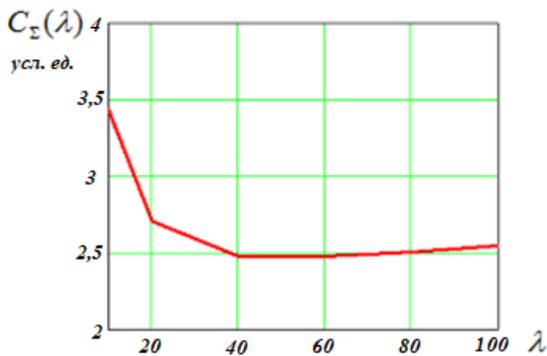


Рис. 4. Изменение суммарных затрат $C_\Sigma(\lambda)$ для $C_{\text{ущ}} = 100$ усл. ед.

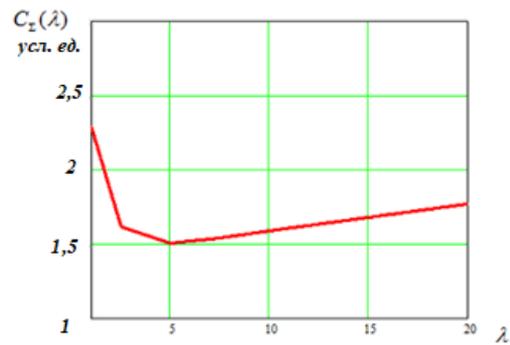


Рис. 5. Изменение суммарных затрат $C_\Sigma(\lambda)$ для $C_{\text{ущ}} = 10$ усл. ед.

Алгоритм прогнозирования работоспособности изделия по результатам контроля его агрегатов

1. Задание исходных данных:

$C_{\text{ущ}}$ – величина ущерба, обусловленного ошибкой контроля;

C_i – затраты на проведение одного испытания при контроле i -го агрегата;

t_γ – аргумент функции нормированного нормального распределения, соответствующий принятому уровню доверительной вероятности γ ($t_\gamma = \arg F^* \{ \gamma \}$);

$k_{v,i}$ – коэффициент вариации коэффициента запаса по рассматриваемому параметру;

h_i – уровень надёжности агрегата, подтверждённый на этапе экспериментальной отработки;

β_{3AD} – заданный уровень риска для изделия в целом;

n_i – число испытаний на этапе экспериментальной отработки.

2. Расчёт оценки математического ожидания коэффициента запаса i -го агрегата, соответствующей надёжности, подтверждённой на этапе экспериментальной отработки:

$$m_{\eta,i} = \frac{\eta_i}{\left(1 - \frac{t_{\gamma,i} k_{V,i}}{\sqrt{n_i}}\right)},$$

где $\eta_i = \frac{1}{1 - \arg F^* \{h_i\} k_{V,i}}$ – оценка коэффициента запаса, соответствующая заданной надёжности агрегата.

3. Расчёт параметра $t_{\gamma,i}$. Параметр $t_{\gamma,i}$ находится методом последовательных приближений по соотношению:

$$t_{\gamma,i} = d_i \sqrt{n_i} (\lambda) = \left[\frac{\lambda}{C_i} \frac{d_i^2}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t_{\gamma,i}^2}{2}} \right],$$

где $d_i = \frac{1}{k_{V,i} m_{\eta,i} - \frac{1}{1 - k_{V,i} t_{h,i}}}$; $t_{h,i} = \arg F^* \{h_i\}$.

4. Расчёт процента брака отдельных агрегатов

$$\beta_i = \left[1 - \int_{-\infty}^{U_i} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}} dx \right],$$

где $U_i = t_{\gamma,i}$ (принято в Mathcad).

5. Расчёт числа испытаний агрегатов

$$n_i = \left[\frac{U_i}{\frac{\eta_i - \frac{1}{1 - \nu_i t_i}}{\nu_i \eta_i}} \right]^2,$$

где $k_{V,i} = \nu_i$ (принято в Mathcad).

6. Расчёт процента брака изделия в целом

$$\beta_{\Sigma} \approx \sum_{i=1}^m \beta_i.$$

7. Оценка значения множителя Лагранжа λ^* . Строится зависимость $\beta_{\Sigma}(\lambda_j)$ (рис. 6).

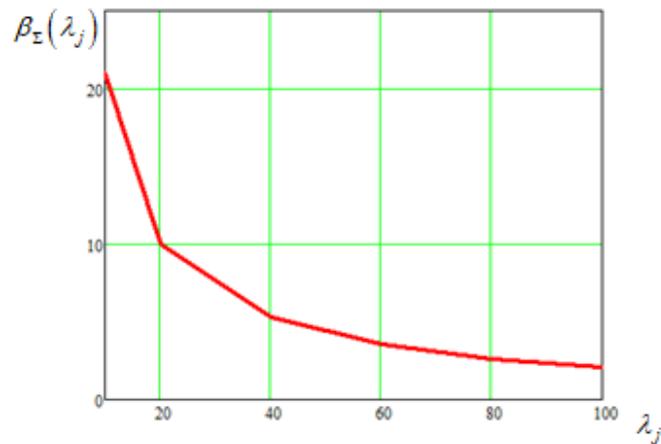


Рис. 6. Изменение суммарного риска по параметру λ_j

Множитель Лагранжа λ^* находится из условия обеспечения заданного уровня суммарного процента брака: $\beta_{\Sigma}(\lambda^*) = \beta_{\text{зад}}$.

Для принятого значения параметра λ^* находим параметры контроля β_i , n_i (по формулам (10) и (11)), обеспечивающие удовлетворение требуемого уровня процента брака изделия [10; 11].

8. **Оптимизация суммарного риска.** Расчёт суммарных затрат проводится по формуле

$$C_{\Sigma}(\lambda) = \sum_{i=1}^m C_i n_i(\lambda) + C_{\text{вщ}} \beta_{\Sigma}(\lambda).$$

Построение зависимости затрат от множителя Лагранжа для различных значений ущерба при отказе производится так, как было показано на рис. 4, 5.

Оптимальный уровень множителя Лагранжа соответствует минимальным затратам [12].

Выводы

1. Разработаны модели прогнозирования параметров контроля сложных технических систем.
2. Предложены вероятностно-стоимостные модели, используемые при контроле работоспособности агрегатов технических систем.
3. Разработаны методы оптимизации числа испытаний агрегатов технических систем при проведении контроля их работоспособности.
4. Предложены методы оценки оптимального уровня суммарного процента брака изделия.
5. Работоспособность предлагаемых подходов проиллюстрирована на конкретном численном примере.

Библиографический список

1. Меньшиков В.А., Рудаков В.Б., Сычев В.Н. Контроль качества космических аппаратов при обработке и производстве. М.: Машиностроение, 2009. 399 с.
2. Золотов А.А., Оделевский В.К., Родченко В.В., Черников А.И. Прикладные методы и алгоритмы обеспечения надёжности и безопасности технических систем на этапе их разработки и эксплуатации. М.: Изд-во МАИ, 2013. 349 с.
3. Надёжность и эффективность в технике: справочник в 10 т. Т. 6. Экспериментальная отработка и испытания / под ред. Р.С. Судакова, О.И. Тескина. М.: Машиностроение, 1989. 375 с.
4. Надёжность и эффективность в технике: справочник в 10 т. Т. 10. Справочные данные по условиям эксплуатации и характеристикам надёжности / под ред. В.А. Кузнецова. М.: Машиностроение, 1990. 330 с.
5. Янко Я. Математико-статистические таблицы. М.: Госстатиздат, 1961. 243 с.
6. Золотов А.А., Родченко В.В., Гусев Е.В. Методика учёта требований по надёжности при выборе проектно-конструкторских решений силовых конструкций ракет-носителей // Полёт. Общероссийский научно-технический журнал. 2023. № 1-2. С. 61-69.
7. Родченко В.В., Гусев Е.В., Карягин И.А. Математическая модель прогнозирования ресурса элементов конструкции, работающих в условиях динамического нагружения // Научно-технический вестник Поволжья. 2023. № 5. С. 85-88.
8. Родченко В.В., Гусев Е.В., Карягин И.А. Разработка математической модели стратегии технического обслуживания с учётом непрерывного контроля // Научно-технический вестник Поволжья. 2023. № 5. С. 89-92.
9. Золотов А.А., Родченко В.В., Гусев Е.В. Методика выбора проектных параметров многофазовых ракет-носителей // Полёт. Общероссийский научно-технический журнал. 2022. № 8-9. С. 63-69.
10. Родченко В.В., Галеев А.Г., Золотов А.А., Галеев А.В. Планирование комплексной отработки сложных технических систем // Альтернативная энергетика и экология. 2015. № 8-9 (172-173). С. 76-85. DOI:10.15518/isjaee.2015.08-09.010
11. Золотов А.А., Родченко В.В., Гусев Е.В. Прогнозирование ресурса многофазовых летательных аппаратов // Полёт. Общероссийский научно-технический журнал. 2022. № 5. С. 22-32.
12. Гусев Е.В., Родченко В.В. Разработка модели выявления неисправностей в процессе проведения технического обслуживания систем летательных аппаратов // Сибирский аэрокосмический журнал. 2021. Т. 22, № 4. С. 638-648. DOI: 10.31772/2712-8970-2021-22-4-638-648

FORECASTING THE PARAMETERS OF PERFORMANCE MONITORING OF COMPLEX TECHNICAL SYSTEMS

© 2024

A. A. Zolotov Doctor of Science (Engineering), Professor, Professor of the Department of Space Systems and Rocket Construction; Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russian Federation; alexandrzolotov41@mail.ru

V. V. Rodchenko Doctor of Science (Engineering), Professor, Professor of the Department of Control of Operation of Space and Missile Systems; Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russian Federation; rodchenko47@mail.ru

E. V. Gusev Candidate of Science (Engineering), Associate Professor of the Department of Control of Operation of Space and Missile Systems; Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russian Federation; cgg-gus@mail.ru

I. A. Karyagin Postgraduate Student of the Department of Control of Operation of Space and Missile Systems; Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russian Federation; jaonto@gmail.com

The problem of monitoring the performance of technical systems is considered, corresponding to the stage of final control during the production of a product, as well as the stage of testing the product before its use. Based on the generalization and development of the existing approaches, models and methods for monitoring the performance of complex technical systems were developed, and models for predicting the parameters of their control were proposed. Methods of optimizing the number of tests of units of technical systems when monitoring their performance were developed. Methods for estimating the optimal level of the total defect rate are proposed. The efficiency of the proposed approaches is illustrated using a specific numerical example. The methods and models presented in the article can be useful for engineering and technical workers of design bureaus, research institutes, research and production associations and enterprises in ensuring the reliability of products and technical systems.

Reliability; experimental testing; number of tests; performance monitoring

Citation: Zolotov A.A., Rodchenko V.V., Gusev E.V., Karyagin I.A. Forecasting the parameters of performance monitoring of complex technical systems. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2024. V. 23, no. 2. P. 109-120. DOI: 10.18287/2541-7533-2024-23-2-109-120

References

1. Men'shikov V.A., Rudakov V.B., Sychev V.N. *Kontrol' kachestva kosmicheskikh apparatov pri otrabotke i proizvodstve* [Quality control of spacecraft during development and production]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 2009. 399 p.
2. Zolotov A.A., Odelevskiy V.K., Rodchenko V.V., Chernikov A.I. *Prikladnye metody i algoritmy obespecheniya nadezhnosti i bezopasnosti tekhnicheskikh sistem na etape ikh razrabotki i ekspluatatsii* [Applied methods and algorithms for ensuring the reliability and safety of technical systems at the stage of their development and operation]. Moscow: MAI Publ., 2013. 349 p.
3. *Nadezhnost' i effektivnost' v tekhnike: spravochnik v 10 t. T. 6. Eksperimental'naya otrabotka i ispytaniya / pod red. R.S. Sudakova, O.I. Teskina* [Reliability and efficiency in technology. Reference book in 10 volumes. Volume 6. Experimental development and testing]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1989. 375 p.
4. *Nadezhnost' i effektivnost' v tekhnike: spravochnik v 10 t. T. 10. Spravochnye dannye po usloviyam ekspluatatsii i kharakteristikam nadezhnosti / pod red. V.A. Kuznetsova* [Reliability and efficiency in technology: Reference book in 10 volumes. Volume 10. Reference data on operating conditions and reliability characteristics]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1990. 330 p.
5. Ianko Y. *Statisticke tabulky*. Praha, 1958. 251 p.
6. Zolotov A.A., Rodchenko E.V., Gusev V.V. Methodology for taking into account the requirements for reliability when choosing design solutions for the load-bearing structures of launch vehicles. *All-Russian Scientific-Technical Journal «Polyot»*. 2023. No. 1-2. P. 61-69. (In Russ.)
7. Rodchenko V.V., Gusev E.V., Karyagin I.A. A mathematical model for predicting the resource of structural elements operating under dynamic loading conditions. *Scientific and Technical Volga Region Bulletin*. 2023. No. 5. P. 85-88. (In Russ.)

8. Rodchenko V.V., Gusev E.V., Karyagin I.A. Development of a mathematical model of a maintenance strategy taking into account continuous monitoring. *Scientific and Technical Volga Region Bulletin*. 2023. No. 5. P. 89-92. (In Russ.)

9. Zolotov A.A., Rodchenko V.V., Gusev E.V. Method for selecting design parameters for reusable launch vehicles. *All-Russian Scientific-Technical Journal «Polyot»*. 2022. No. 8-9. P. 63-69. (In Russ.)

10. Rodchenko V.V., Galeev A.G., Zolotov A.A., Galeev A.V. Planning of integrated tests of complex technical systems. *Alternative Energy and Ecology*. 2015. No. 8-9 (172-173). P. 76-85. (In Russ.)

11. Zolotov A.A., Rodchenko V.V., Gusev E.V. Forecasting the resource of reusable aircraft devices. *All-Russian Scientific-Technical Journal «Polyot»*. 2022. No. 5. P. 22-32. (In Russ.)

12. Gusev E.V., Rodchenko V.V. Development of a model for detecting malfunctions during the maintenance of aircraft units and systems. *Siberian Aerospace Journal*. 2021. V. 22, no. 4. P. 638-648. (In Russ.). DOI: 10.31772/2712-8970-2021-22-4-638-648