

ПЛАНИРОВАНИЕ КОМПЛЕКСНОЙ ОТРАБОТКИ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

В.В. Родченко, А.Г. Галеев, А.А. Золотов, А.В. Галеев

Московский авиационный институт
(Национальный исследовательский университет)
125993 Москва, ГСП-3, А-80, Волоколамское ш., д. 4
Тел.: (8-499) 158-91-36, e-mail: galant1992@mail.ru

Заключение совета рецензентов: 06.06.15 Заключение совета экспертов: 09.06.15 Принято к публикации: 12.06.15

В работе предложена аналитическая модель прогнозирования изменения показателей надежности в процессе проведения комплексной экспериментальной отработки (ЭО) сложных технических систем (СТС) – объектов ракетно-космической техники (РКТ).

Разработаны методы планирования испытаний на различных этапах комплексной экспериментальной отработки, обеспечивающей подтверждение заданных требований к надежности анализируемых систем при минимальных затратах средств.

Представленные результаты позволяют оперативно решать задачи планирования и оптимизации комплексной экспериментальной отработки СТС для различных прикладных задач в широком спектре исходных данных.

Ключевые слова: сложная техническая система, ракетно-космическая техника, автономные и комплексные испытания, надежность, планирование, число испытаний.

PLANNING OF INTEGRATED TESTS OF COMPLEX TECHNICAL SYSTEMS

V.V. Rodchenko, A.G. Galeev, A.A. Zolotov, A.V. Galeev

Moscow Aviation Institute
(National Research University)
4 Volokolamskoe sh., Moscow, 125993, GSP-3, A-80, Russia
Tel.: (8-499) 158-91-36, e-mail: galant1992@mail.ru

Referred: 06.06.15 Expertise: 09.06.15 Accepted: 12.06.15

The paper presents an analytical model for predicting changes in the indices of reliability in the process of comprehensive experimental work (EW) complex technical systems (CTS) – objects rocket and space technology (RST).

Methods of planning of volumes of tests at different stages of the complex experimental testing, providing acknowledgment of the requirements for the reliability of the analyzed system at the lowest cost of funds.

The presented results allow to quickly resolve the planning and optimization of autonomous and complex experimental testing of CTS for various applications in a wide range of input data.

Keywords: complex technical systems, rocket and space technology, autonomous and complex testing, reliability, planning, number of tests.





Владимир
Викторович
Родченко
Vladimir V.
Rodchenko

Сведения об авторе: д-р техн. наук, профессор, почетный работник высшей школы, действительный член Российской академии космонавтики им. К.Э. Циолковского, зам. зав. кафедрой «Управление эксплуатацией ракетно-космических систем» МАИ; научно-педагогический стаж более 40 лет.

Был руководителем и участвовал в выполнении ряда хоздоговорных работ по заказам промышленности, в том числе по программам «Энергия-Буран», «Магистраль», «Синева» и др.

Образование: Московский авиационный институт (1970).

Область научных интересов: теория и практика создания реактивных устройств, способных двигаться в грунтах с высокими скоростями; отработка сложных технических систем.

Публикации: более 180, в том числе 7 монографий, 9 учебных пособий, 4 авторских свидетельства и патента на изобретения.

Information about the author: Doctor of Science, Professor, Honorary Worker of Higher School, member of the K.E. Tsiolkovsky Russian Academy of Cosmonautics, the Deputy Head of the department "Management of operation of rocket and space systems" of Moscow Aviation Institute (National Research University); scientific and pedagogical experience more than 40 years. He was a leader and participated in the implementation of a number of contractual works on the orders of the industry, including the following programs: "Energia-Buran", "Highway", "The blue", etc.

Education: Moscow Aviation Institute (1970).

Research area: Theory and practice of jet devices that can move in the ground at high speeds; testing of complex technical systems.

Publications: more than 180, including 7 monographs, 9 textbooks, 4 patents for inventions.

Сведения об авторе: д-р техн. наук, профессор, лауреат премии Совета Министров СССР в области науки и техники, действительный член Российской академии космонавтики им. К.Э. Циолковского, главный научный сотрудник ФКП «НИЦ РКП», профессор кафедры «Управление эксплуатацией ракетно-космических систем» МАИ; научно-педагогический стаж более 40 лет.

Участвовал в отработке ряда систем по ракетно-космическим программам «Космос-1», «Космос-3», «Н1Л3», «Энергия-Буран», «GSLV», «Ангара» и др.

Образование: Казанский авиационный институт (1961).

Область научных интересов: теория и практика наземных испытаний ракетных двигателей и двигательных установок, гидро- и газодинамика процессов в энергоустановках, исследования в области водородной технологии.

Публикации: более 180, в том числе 6 монографий, 6 учебных пособий, 44 авторских свидетельства и патента на изобретения.

Information about the author: Doctor of Science (Engineering Science), Professor, Laureate of USSR Council of Ministers in the field of science and technology, member of the K.E. Tsiolkovsky Russian Academy of Cosmonautics, Chief Researcher of the PCF "SIC RSI", professor of "Management of operation of rocket and space systems" of Moscow Aviation Institute (National Research University); scientific and pedagogical experience of 40 years. Participated in working out a number of systems for missile and space programs "Space-1", "Space-3", "N1L3", "Energia-Buran", "GSLV", "Angara" and others..

Education: Kazan Aviation Institute (1961).

Research area: theory and practice ground tests of rocket engines and moving-enforcement units, hydro and gas dynamics processes in power plants, research in the field of water-native technology.

Publications: more than 180, including 6 monographs, 6 textbooks, 44 patents for inventions.

Сведения об авторе: д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры «Космические системы и ракетостроение» МАИ; почетный работник высшей школы, научно-педагогический стаж более 40 лет.

Был руководителем и участвовал в выполнении важнейших госбюджетных тем и хоздоговорных работ по заказам промышленности.

Образование: Московский авиационный институт (1964).

Область научных интересов: обеспечение надежности ракетно-космической техники.

Публикации: более 150, в том числе 8 монографий, 9 учебных пособий.

Information about the author: Ph.D., Professor, Department of "Space systems and rocket science" of the Moscow Aviation Institute (National Research University); Honorary Worker of Higher School, research and teaching experience of more than 40 years.

He was a leader and participated in the implementation of the major state budget and contract work on the orders of industry.

Education: Moscow Aviation Institute (1964).

Research area: ensuring the reliability of the rocket and space technology.

Publications: more than 150, including 8 monographs, 9 textbooks.



Айвенго Гадыевич
Галеев
Aivengo G. Galeev



Александр Алексеевич
Золотов
Alexandr A. Zolotov





Антон Валерьевич
Галеев
Anton V. Galeev

Сведения об авторе: инженер кафедры «Управление эксплуатацией ракетно-космических систем» МАИ.

Образование: Московский авиационный институт (2014).

Область научных интересов: теория и практика наземных испытаний ракетных двигателей и двигательных установок.

Публикации: 2.

Information about the author: Engineer Department of “Management of operation of rocket and space systems” Moscow Aviation Institute (National Research University).

Education: Moscow Aviation Institute (2014).

Research area: theory and practice ground tests of rocket engines and propulsion systems.

Publications: 2.

Введение

Экспериментальная отработка СТС сводится к последовательным испытаниям по иерархическому признаку по схеме «снизу вверх», включающим как автономные испытания элементов, систем, так и комплексные испытания группы систем и изделия в целом. Началу отработки соответствуют всесторонние проверки элементов структуры низших уровней с последующим усложнением объектов испытаний и переходом к испытаниям более высокого уровня. Критерии перехода к испытаниям более высокого уровня обычно формируются в виде условий достижения определенного уровня надежности. Знание надежности отдельных элементов позволяет рассчитать надежность системы в целом.

Рост изменения надежности происходит в процессе проектирования и ЭО, который имеет вид, представленный на рис. 1 [1, 2].

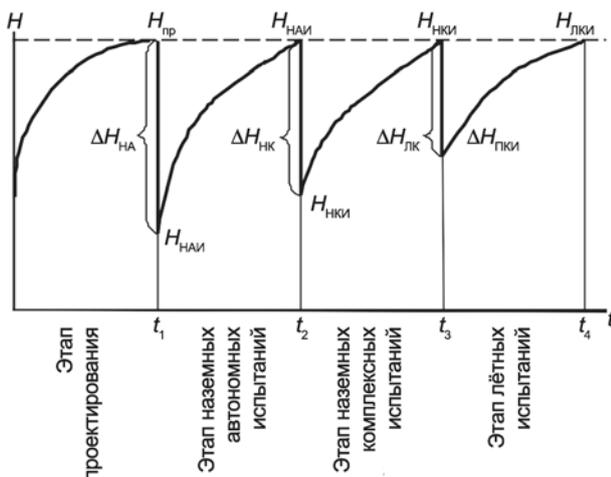


Рис. 1. Характер изменения оценок надежности на этапах проектирования и ЭО

Fig. 1. The nature of changes in estimates of reliability during the design and EW

На этапах проектирования учесть все факторы невозможно, они определяются на этапах ЭО, включающих наземные автономные испытания (НАИ), наземные комплексные (НКИ) и лётно-конструкторские испытания (ЛКИ), с учетом полученных экспериментальных данных.

Поэтому после завершения автономных испытаний отдельных систем переходят к стендовым совместным испытаниям этих систем. При проведении комплексных испытаний реальная надежность системы повышается за счет устранения выявленных источников отказа. В дальнейшем рассмотрим изменение вероятности отказа, обусловленное взаимодействием элементов, входящих в состав системы, по числу испытаний для произвольного j -го этапа комплексной отработки.

Прогнозирование параметров экспериментальной отработки

При создании модели прогнозирования надежности будем считать известными значения коэффициентов запаса по каждому из рассматриваемых параметров. Ими являются те коэффициенты запаса, которые закладываются при проектировании изделия. В дальнейшем задача заключается в том, чтобы обеспечить достижение запроектированных уровней избыточности в реальном изделии. Это означает, что нужно либо подтвердить надежность, заданную на этапе проектирования, либо выявить источники отказа и провести необходимые доработки для достижения требуемого уровня надежности, заданного в проекте. Как показано в работе [1], моменты окончания испытаний определяются пересечением случайных траекторий \hat{m}_η с граничными кривыми $\eta_{гр.верх.}(k)$ и $\eta_{гр.ниж.}(k)$ (рис. 2).



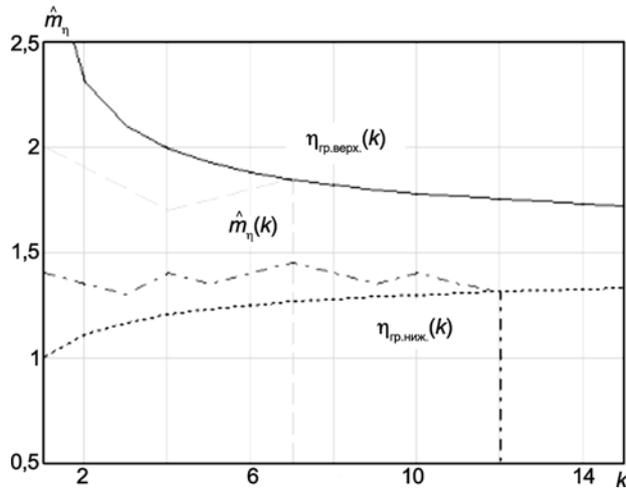


Рис. 2. Оценка моментов окончания испытаний
Fig. 2. Evaluation of the end of the test

Граничные кривые удовлетворяют соотношениям

$$\eta_{гр} = \frac{\eta_{зад}}{1 \pm (t_{\gamma}/\sqrt{k})\sqrt{k_V^2(x_d) + k_V^2(x_{доп})}};$$

$$\eta_{зад} = \frac{1}{1 - \arg F^* \{H_{зад}\} k_{V\Sigma}}; k_{V\Sigma} = \sqrt{k_V^2(x_d) + k_V^2(x_{доп})},$$

где $k_V(x_d)$; $k_V(x_{доп})$ – соответственно, коэффициенты вариации действующих и допустимых значений параметров; t_{γ} – квантиль, соответствующий принятому уровню доверительной вероятности γ ; $H_{зад}$ – заданный уровень надежности.

В дальнейшем оценим среднее число пересечений траекторий \hat{m}_n граничных кривых $\eta_{гр.верх.}(k)$ и $\eta_{гр.ниж.}(k)$. При решении задачи в качестве нулевой гипотезы примем гипотезу «доверия» – $H_0 : \hat{m}_n \geq \eta_{гр.верх.}$, предполагающую подтверждение требований к надежности. Очевидно, в случае подтверждения надежности достигается верхняя граничная кривая, т. е. выполняется соотношение

$$\hat{m}_n(k) = \eta_{гр.верх.}(k). \quad (1)$$

Вероятность этого события равна $(1 - \alpha) = \gamma$, как вероятность приемки правильной гипотезы. Здесь вероятность α характеризует ошибку первого рода. Применяя к обеим частям (1) операцию взятия условного математического ожидания, получим $M\{\hat{m}_n(k)/H_0\} = M\{\eta_{гр.верх.}(k)/H_0\}$.

Соответственно, при достижении нижней границы выполняется соотношение

$$\hat{m}_n(k) = \eta_{гр.ниж.}(k). \quad (2)$$

При этом происходит браковка устройства. Очевидно, вероятность этого события равна $\alpha = 1 - \gamma$,

как вероятность браковки правильной гипотезы. Применяя к обеим частям (2) операцию взятия условного математического ожидания, получим

$$M\{\hat{m}_n(k)/H_0\} = M\{\eta_{гр.ниж.}(k)/H_0\}.$$

Отсюда по формуле полной вероятности получим

$$m_n = M\{\eta_{гр.верх.}(k)/H_0\}(1 - \alpha) + M\{\eta_{гр.ниж.}(k)/H_0\}\alpha.$$

В линейном приближении соотношение можно представить в виде

$$m_n = \frac{\eta_{зад}}{1 - (t_{\gamma}/\sqrt{k_{cp}})\sqrt{k_V^2(x_d) + k_V^2(x_{доп})}}(1 - \alpha) + \frac{\eta_{зад}}{1 + (t_{\gamma}/\sqrt{k_{cp}})\sqrt{k_V^2(x_d) + k_V^2(x_{доп})}}, \quad (3)$$

где $k_{cp} = M\{k\}$.

Таким образом, задание значения коэффициентов запаса по каждому из рассматриваемых параметров позволяет по (3) определить средний объем испытаний, необходимый для подтверждения требуемых уровней надежности устройства. Характер зависимости $m_n(k_{cp})$ представлен на рис. 3.

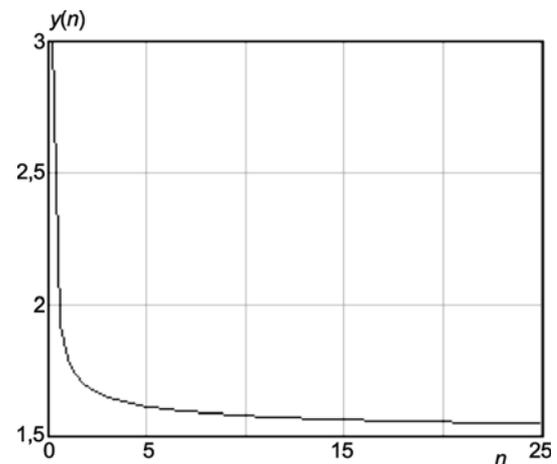


Рис. 3. Зависимость математического ожидания коэффициента запаса $m_n = y(n)$ от среднего числа испытаний $n = k_{cp}$

Fig. 3. The dependence of the expectation of the safety factor $m_n = y(n)$ the average number of tests $n = k_{cp}$

Если при проведении экспериментальной отработки проводятся измерения по нескольким параметрам работоспособности (M), средний объем испытаний $k_{cp,M}$ будет определяться переходом в область подтверждения надежности всех измеряемых параметров.

При проведении расчетов были приняты следующие исходные данные: $k_{V\Sigma} = 0,1$; $\eta = 1,5$; $t_{\gamma} = t$; $\alpha = 0,05$.

В рассматриваемом случае среднее число испытаний является аналогом среднего времени безотказ-



ной работы устройства для резервированной системы с M постоянно включенными элементами («горячий» резерв). Таким образом, величина $k_{cp,M}$ может быть оценена по соотношению

$$k_{cp,M} = k_{cp} \left(1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \dots + \frac{1}{M} \right), \quad (4)$$

где k_{cp} – средний объем испытаний для подтверждения надежности по одному параметру работоспособности, оцениваемый по (3).

Соотношение (4) соответствует случаю равенства вероятностных характеристик по всем условиям работоспособности. Разрешая (3) относительно k_{cp} , получим

$$k_{cp,1} = \frac{(t_{\gamma} k_{V\Sigma})^2}{\left\{ (0,5 - \alpha) \bar{\eta} + \sqrt{(0,5 - \alpha)^2 \bar{\eta}^2 + (1 - \bar{\eta})} \right\}^2}, \quad (5)$$

где $\bar{\eta} = \eta_{зад} / m_{\eta}$; $\eta_{зад} = 1 / (1 - k_{V\Sigma} t_H)$; $t_H = \arg F^* \{ H_{зад} \}$; $t_{\gamma} = \arg F^* \{ \gamma \}$.

Зависимость k_{cp} от параметра $\bar{\eta}$ для $\alpha = 0,05$ и различных значений $t_{\gamma} k_{V\Sigma}$ представлена на рис. 4.

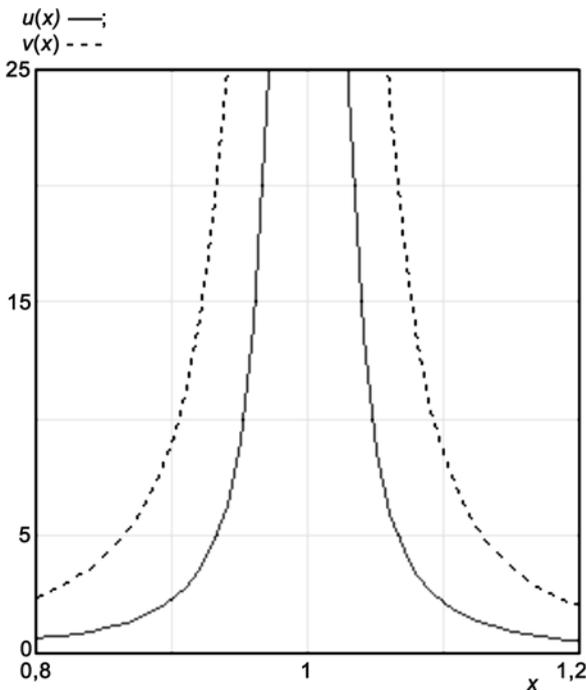


Рис. 4. Зависимость среднего числа испытаний $k_{cp}(\bar{\eta}) = u(x)$, соответствующего значению $t_{\gamma} k_{V\Sigma} = 0,165$, и среднего числа испытаний $k_{cp}(\bar{\eta}) = v(x)$, соответствующего значению $t_{\gamma} k_{V\Sigma} = 0,33$, от коэффициента $\bar{\eta} = x$
Fig. 4. The dependence of the average number of tests $k_{cp}(\bar{\eta}) = u(x)$, corresponding to the value $t_{\gamma} k_{V\Sigma} = 0,165$ and the average number of tests $k_{cp}(\bar{\eta}) = v(x)$, corresponding to the value $t_{\gamma} k_{V\Sigma} = 0,33$ of the coefficient $\bar{\eta} = x$

В дальнейшем найдем оценку гарантированного объема испытаний, обеспечивающих подтверждение требуемых уровней надежности.

Как было показано выше, для гипотезы H_0 область ω , лежащая ниже верхней границы $\eta_{гр.верх}(k)$, является критической (рис. 5).

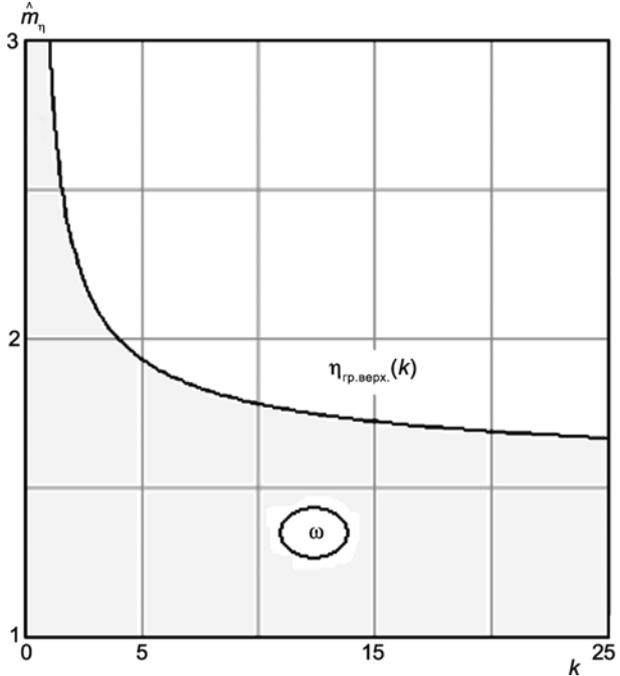


Рис. 5. Построение критической области ω
Fig. 5. Construction of the critical region ω

Согласно определению ошибки первого рода имеем

$$P\{\hat{m}_{\eta} \subset \Omega - \omega / H_0\} = 1 - \alpha.$$

В дальнейшем оценим вероятность выполнения этого события после проведения k испытаний:

$$P\{\hat{m}_{\eta}(k) > \eta_{гр.верх}(k)\} = 1 - \alpha = \gamma.$$

В предположении нормального закона распределения $\hat{m}_{\eta}(k)$ получим

$$P_k(A) = 1 - P\{\hat{m}_{\eta}(k) < \eta_{гр.верх}(k)\} = 1 - F^* \left\{ \frac{\eta_{гр.верх}(k) - m_{\eta}}{\sigma_{\hat{m}_{\eta}}} \right\}. \quad (6)$$

После преобразований (6) примет вид

$$P_k(A) = 1 - F^* \left\{ \frac{\eta_{зад} / (1 - t_{\gamma} k_{V\Sigma} / \sqrt{k}) - m_{\eta}}{m_{\eta} k_{V\Sigma} / \sqrt{k}} \right\} = F^* \left\{ \frac{1 - (\eta_{зад} / m_{\eta}) / (1 - t_{\gamma} k_{V\Sigma} / \sqrt{k})}{k_{V\Sigma} / \sqrt{k}} \right\}, \quad (7)$$

где

$$\eta_{\text{зад}} = \frac{1}{1 - \arg F^* \{H_{\text{зад}}\} k_{V\Sigma}}; \quad k_{V\Sigma} = \sqrt{k_V^2(x_d) + k_V^2(x_{\text{доп}})}.$$

Тогда задание определенного уровня доверия γ позволяет по соотношению

$$P_k(A) = \gamma \quad (8)$$

определить уровни надежности изделия, подтверждаемые после проведения k испытаний.

С учетом (7) получим

$$F^* \left\{ \frac{1 - (\eta_{\text{зад}}/m_\eta) / (1 - t_\gamma k_{V\Sigma} / \sqrt{k})}{k_{V\Sigma} / \sqrt{k}} \right\} = F^*(t_\gamma),$$

где $t_\gamma = \arg F^* \{\gamma\}$.

Разрешая это соотношение относительно m_η , найдем $m_\eta = \eta_{\text{зад}} (1 - t_\gamma k_{V\Sigma} / \sqrt{k})^{-2}$.

Характер зависимости m_η от гарантированного числа испытаний $f(n)$ и от среднего числа испытаний $y(n)$ представлен на рис. 6.

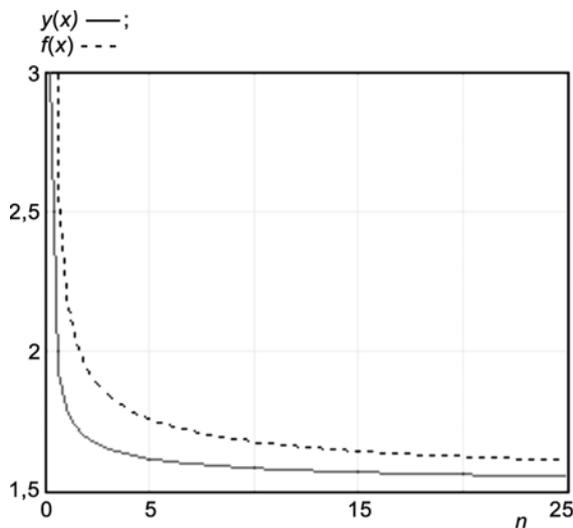


Рис. 6. Зависимость $m_\eta = f(n)$ от гарантированного числа испытаний и зависимость $m_\eta = y(n)$ от среднего числа испытаний
Fig. 6. Dependence $m_\eta = f(n)$ of the guaranteed number of tests and the dependence $m_\eta = y(n)$ of the average number of tests

Для каждого заданного значения m_η по графику можно оценить средние и гарантированные объемы испытаний, необходимые для подтверждения уровня надежности, соответствующего значению $\eta_{\text{зад}} = 1,5$.

Общий объем испытаний при проведении комплексной отработки будет определяться числом испытаний, необходимых для подтверждения заданного уровня надежности, и количеством отказов, проявившихся при проведении испытаний [3]. В

дальнейшем оценим зависимость подтверждаемых уровней надежности от числа испытаний k . С этой целью воспользуемся (5) для среднего объема испытаний. Для значений $\alpha = 0$ (5) примет вид

$$m_\eta \approx \frac{\eta_{\text{зад}}}{1 - k_{V\Sigma} t_\gamma / \sqrt{k_{\text{cp}}}}. \quad (9)$$

Разрешая (9) относительно $\eta_{\text{зад}}$ после проведения k испытаний, найдем

$$\eta_{\text{зад}} = m_\eta (1 - t_\gamma k_{V\Sigma} / \sqrt{k_{\text{cp}}}).$$

Раскрывая выражение для H_k , равное $H_k = F^* \{(\eta_{\text{зад}} - 1) / m_\eta k_{V\Sigma}\}$, получим

$$H_k = F^* \left\{ \frac{m_\eta - 1}{m_\eta k_{V\Sigma}} - \frac{t_\gamma m_\eta k_{V\Sigma}}{m_\eta k_{V\Sigma} \sqrt{k_{\text{cp}}}} \right\} = F^* \{W\},$$

где $W = \frac{m_\eta - 1}{k_{V\Sigma} m_\eta} - \frac{t_\gamma}{\sqrt{k_{\text{cp}}}}$.

В случае измерения M параметров, предполагая, что по каждому параметру подтверждаются одинаковые уровни надежности, вероятность отказа системы будет оцениваться по [2]

$$Q_k = \left\{ \int_{-\infty}^{-W} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-0.5U^2} dU \right\} \sqrt{M}.$$

Изменение логарифма вероятности отказа от числа испытаний представлено на рис. 7.

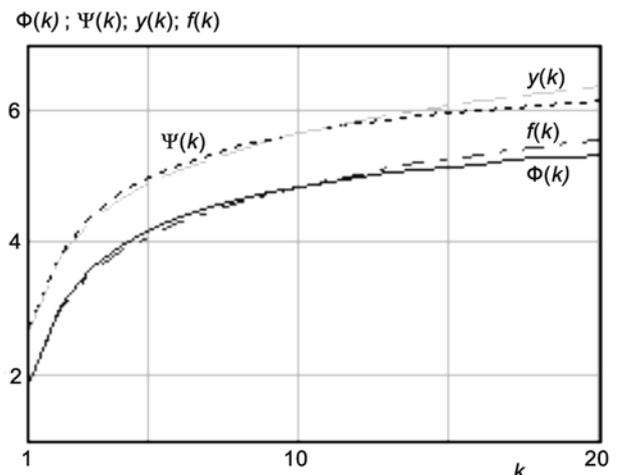


Рис. 7. Характер изменения логарифма вероятности отказа $\Phi(k)$ и $\Psi(k)$ по числу испытаний, соответственно, для различного числа источников отказа $M = 10$ и $M = 2$

Fig. 7. The nature of the change of the logarithm of the probability of failure $\Phi(k)$ and $\Psi(k)$ on number of trials, respectively, for various sources of failure $M = 10$ and $M = 2$

При проведении расчетов были приняты следующие исходные данные: коэффициент вариации $k_{V\Sigma} = 0,1$; коэффициент запаса $m_\eta = 1,5$; доверительная вероятность $\gamma = 0,95$ ($t_\gamma = 1,65$).

На графиках представлены также аппроксимирующие зависимости

$$y(k) = \ln(k - 0,5) + 3,4; f(k) = \ln(k - 0,5) + 2,6$$

для кривых $\Psi(k)$ и $\Phi(k)$ соответственно.

Таким образом, изменение вероятности отказа по числу испытаний можно представить в виде

$$Q = e^{-\alpha} / (k - \beta),$$

где α и β – аппроксимирующие коэффициенты.

Согласно полученным выше результатам, аппроксимирующие коэффициенты для $M = 10$ будут равны $\alpha = 2,6$; $\beta = 0,5$. Характер изменения надежности по числу испытаний для рассматриваемого случая представлен на рис. 8.

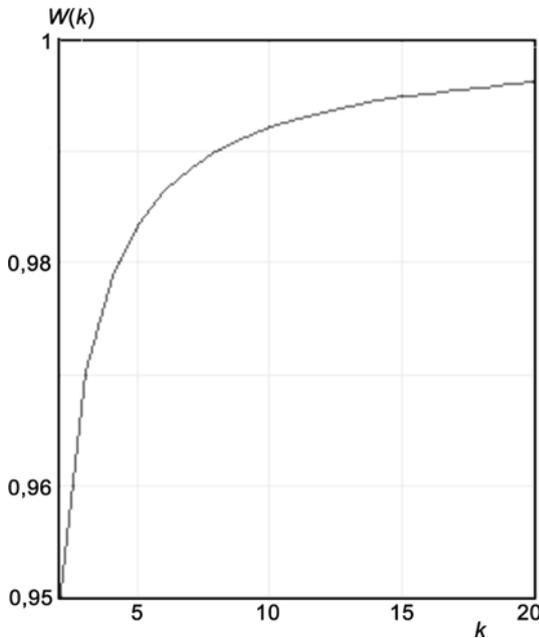


Рис. 8. Изменение надежности $W(k)$ по числу испытаний
Fig. 8. Change reliability $W(k)$ by the number of trials

В заключение отметим, что в случае M параметров, учитывая (4), суммарный объем испытаний можно оценить по соотношению $k_{\text{ср},M} = k\xi$, где

$$\xi = \sum_{i=1}^M i^{-1}.$$

Оптимизация объемов испытаний на различных этапах комплексной отработки

Как отмечалось выше, после отработки отдельных элементов СТС при автономных испытаниях проводят комплексные испытания систем, работаю-

щих совместно. Эти испытания проводятся поэтапно. Очевидно, затраты на обеспечение надежности при проведении j -го этапа комплексной отработки будут определяться стоимостью проведения испытаний и затратами на устранение обнаруженных неисправностей.

В линейном приближении можно принять

$$C_{\text{ки},j} = c_j k_j \xi + A_{0,j},$$

где c_j – удельные затраты на одно испытание; $A_{0,j}$ – прочие затраты с учетом проведения доработок при отказах.

Планирование комплексных испытаний заключается в определении объема испытаний на каждом из этапов ЭО. В результате проведения полного цикла испытаний должны быть удовлетворены требования, предъявляемые к надежности, т. е.

$$H_{\text{ки}} = 1 - Q_{\text{ки}}, \quad (10)$$

где $Q_{\text{ки}} = \sum_{j=1}^r q_{\text{ки},j} = \sum_{j=1}^r \frac{1}{k_j - \beta_j} e^{-\alpha_j}$; $q_{\text{ки},j}$ – вероятность

отказа, достигаемая на j -м этапе комплексной отработки; r – число этапов комплексных испытаний.

Как видно из (10), заданные уровни надежности СТС можно обеспечить при различных сочетаниях вероятностей отказа $q_{\text{ки},j}$ [4-6].

При этом конкретные уровни вероятности отказа, $q_{\text{ки},j}$, удовлетворяющие дисциплинирующему условию (10), целесообразно назначать из условия минимизации суммарных затрат C_Σ на проведение ЭО

$$C_{\text{ки}} = \sum_{j=1}^r c_j k_j \xi_j.$$

Для рассматриваемого случая функция Лагранжа будет равна

$$L = C_{\text{ки}} + \lambda(Q_{\text{ки}} - Q_{\text{зад}}).$$

Таким образом, оптимальные уровни числа испытаний k_j и соответствующие им вероятностей отказа $q_{\text{ки},j}$ должны удовлетворять соотношению

$$\partial L / \partial k_j = 0.$$

Раскрывая выражения для производных, приходим к системе алгебраических уравнений

$$c_j \xi_j - \lambda (e^{-\alpha_j})^2 \frac{e^{\alpha_j}}{(k_j - \beta_j)^2} = 0,$$

где $j = 1, 2, \dots, r$.

Разрешая уравнения относительно вероятностей отказа, получим

$$q_{\text{ки},j} = \sqrt{\lambda^{-1} c_j \xi_j e^{-\alpha_j}}.$$

После подстановки в дисциплинирующее условие будем иметь

$$Q_{\text{зад}} = \frac{1}{\sqrt{\lambda}} \sum_{j=1}^r \sqrt{c_j \xi_j e^{-\alpha_j}}$$

Отсюда

$$q_{\text{ки},j} = \sqrt{c_j \xi_j e^{-\alpha_j}} \frac{Q_{\text{зад}}}{\sum_{j=1}^r \sqrt{c_j \xi_j e^{-\alpha_j}}}$$

Знание $q_{\text{ки},j}$ позволяет оценить объемы испытаний на различных этапах комплексной отработки:

$$k_j = \frac{e^{-\alpha_j} \sum_{j=1}^r \sqrt{c_j \xi_j e^{-\alpha_j}}}{Q_{\text{зад}} \sqrt{c_j \xi_j e^{-\alpha_j}}} + \beta_j = \frac{e^{-\alpha_j}}{q_{\text{ки},j}} + \beta_j$$

Работоспособность предложенного выше подхода проиллюстрирована на модельном примере. При проведении расчетов были приняты следующие исходные данные:

$$H_{\text{зад}} = 0,96; (Q_{\text{зад}} = R = 0,04); r = 4;$$

$$C := \begin{pmatrix} 2,5 \\ 2 \\ 1,5 \\ 3 \end{pmatrix}; \quad A := \begin{pmatrix} 2,6 \\ 3,4 \\ 3 \\ 4 \end{pmatrix}; \quad D := \begin{pmatrix} 0,5 \\ 0,3 \\ 0,7 \\ 0,4 \end{pmatrix}; \quad M := \begin{pmatrix} 1 \\ 5 \\ 3 \\ 7 \end{pmatrix},$$

где C – матрица стоимостей проведения одного испытания c ; A – матрица значений коэффициентов аппроксимации $0,5\alpha$; D – матрица значений коэффициентов аппроксимации β ; M – матрица числа анализируемых параметров.

$$R := 0,04 \quad i := 0,1,2,3$$

$$C := \begin{pmatrix} 2,5 \\ 2 \\ 1,5 \\ 3 \end{pmatrix} \quad A := \begin{pmatrix} 2,6 \\ 3,4 \\ 3 \\ 4 \end{pmatrix} \quad D := \begin{pmatrix} 0,5 \\ 0,3 \\ 0,7 \\ 0,4 \end{pmatrix} \quad M := \begin{pmatrix} 1 \\ 5 \\ 3 \\ 7 \end{pmatrix}$$

$$\Phi_i := \sum_{j=1}^{M_{i0}} j^{-1} \quad F := \begin{pmatrix} 1 \\ 2,283 \\ 1,833 \\ 2,593 \end{pmatrix} \quad \Phi := F^{0,5} \quad \Phi := \begin{pmatrix} 1 \\ 1,511 \\ 1,354 \\ 1,61 \end{pmatrix}$$

$$T := (\overline{C \cdot \Phi}) \quad T := \begin{pmatrix} 2,5 \\ 3,022 \\ 2,031 \\ 4,831 \end{pmatrix} \quad B := (\overline{e^{-A}}) \quad B := \begin{pmatrix} 0,074 \\ 0,033 \\ 0,05 \\ 0,018 \end{pmatrix}$$

$$W := R \cdot \left((T^T \cdot B)^{-1} \right) \cdot \left(T \cdot e^{-A} \right) \quad K := D + \left(B \cdot W^{-1} \right)$$

$$W := \begin{pmatrix} 0,016 \\ 8,473 \cdot 10^{-3} \\ 8,495 \cdot 10^{-3} \\ 7,433 \cdot 10^{-3} \end{pmatrix} \quad K := \begin{pmatrix} 5,261 \\ 4,239 \\ 6,561 \\ 2,864 \end{pmatrix}$$

Рис. 9. Алгоритм проведения расчетов модельного примера
Fig. 9. The algorithm of the calculation model example

Программа проведения расчетов представлена на рис. 9.

При разработке программы были приняты следующие обозначения: F – матрица значений параметров ξ ; W – матрица оптимальных уровней вероятностей отказа по этапам ЭО; K – матрица числа испытаний на различных этапах ЭО; Φ , T , B – матрицы промежуточных вычислений.

Результаты расчетов представлены в табл. 1.

Таблица 1
Результаты расчетов надежности СТС, достигаемой на этапе комплексной отработки, и потребного количества испытаний

Table 1
The results of calculations of reliability CTS achieved at the stage of working out the complex and the necessary number of tests

Номер этапа комплексной отработки	Надежность H , достигаемая на отдельных этапах комплексной отработки	Потребное число испытаний
1	0,9840	6
2	0,9915	5
3	0,9915	7
4	0,9926	3
Надежность СТС	0,9602	

Таким образом, предложенный подход позволяет проводить оптимальное распределение надежности между различными этапами комплексной отработки систем, а также оценивать потребные объемы испытаний, обеспечивающие удовлетворение требований, предъявляемых к надежности анализируемых систем.

При проведении испытаний типа «успех – отказ» для подтверждения высоких уровней надежности требуется очень большое число испытаний. Для примера в табл. 2 представлены объемы испытаний k и соответствующие им значения нижней границы H_n при безотказных испытаниях ($\gamma = 0,95$).

Таблица 2
Объемы испытаний и нижняя граница H_n безотказной работы

Table 2
Trial size and the lower limit H_n of uptime

k	10	100	1000	10000
H_n	0,74	0,97	0,997	0,9997

Таким образом, для подтверждения нижней границы вероятности безотказной работы (ВБР) $P_n > 0,99$ при доверительной вероятности 0,95 необходимо провести $n = 300$ безотказных испытаний, а для $P_n > 0,999$ – более 1000 безотказных испытаний [2, 7]. Очевидно, проведение большого количества испытаний для целого ряда уникальных дорогостоящих объектов не представляется возможным. Для указанных систем объем испытаний, как правило, предопределен возможностями технологической базы, стоимостью или сроками отработки. В связи с этим возникает задача подтверждения высоких уровней надежности при малом числе испытаний.

Трудность статистического подтверждения высокого уровня надежности изделий при малом числе испытаний типа «успех – отказ» заключается в том, что в этом случае в процессе испытания используется минимальная информация о вероятностных свойствах изучаемого объекта, и этот недостаток информации нужно компенсировать увеличением количества самих испытаний. В связи с этим возникает задача повышения информативности испытаний. В частности, при измерении параметров, определяющих работоспособность устройства, объем испытаний может быть существенно сокращен.

При этом малые объемы испытаний обеспечиваются заданием высоких уровней коэффициентов запаса, закладываемых на этапе проектной разработки.

В случае измерения времени безотказной работы для подтверждения высоких уровней надежности при ограниченных объемах испытаний требуется обеспечить высокие уровни коэффициента временного запаса, т.е. среднее время безотказной работы должно существенно превышать время работы устройства.

В целом при проведении испытаний с измерением параметров устройства или времени безотказной работы оптимальные объемы испытаний определяются соотношением удельных затрат на обеспечение единицы надежности и затрат на проведение одного испытания, при этом большим удельным затратам соответствуют меньшие уровни надежности.

Как отмечалось выше, экспериментальная отработка СТС сводится к последовательным испытаниям по иерархическому признаку по схеме «снизу вверх», начиная со структур низших уровней с последующим усложнением объектов испытаний и переходом к испытаниям более высокого уровня.

Первым этапом испытаний является конструкторская отработка опытных образцов, имеющая целью уточнить проектные данные и выбрать штатный вариант конструкции. Этот этап включает, как правило, предварительные испытания опытных образцов, занимающих 15-20% от общего объема испытаний. Затем следует доводка штатного варианта изделия и оценка его тактико-технических характеристик, со-

ставляющих основной объем доводочных испытаний (ДИ) при создании ДУ (60-70%). Объем завершающих доводочных испытаний (ЗДИ) составляет до 10-25%. Отработка сложных технических систем, к которым относятся двигатели, ДУ и ЛА, завершается, как правило, государственными (межведомственными или сертификационными) испытаниями (МВИ) [7, 8].

Для иллюстрации приведем статистику испытаний, например, кислородно-водородного двигателя 11Д57 (тяга 392 кН, давление в камере $p_k = 11$ МПа), не имевшего аналогов в отечественном и зарубежном двигателестроении, и его агрегатов и систем на натуральных компонентах. Экспериментальная отработка проводилась в 1964-1970 гг. и включала 900 испытаний агрегатов и систем двигателя и около 600 испытаний двигателя, которые были завершены проведением МВИ [7]. Объемы испытаний агрегатов и систем распределены следующим образом:

- автономные испытания насосов горючего составляли 15%, насосов окислителя – 58% и ТНА с газогенератором – 27% от всего объема (~740) испытаний систем питания;

- автономные испытания газогенератора привода ТНА и газогенератора совместно с камерой сгорания – ~150 испытаний.

Таким образом, наибольший объем испытаний приходился на отработку насосных агрегатов на жидком кислороде. Это вызвано влиянием на работоспособность насоса свойств перекачиваемой среды, способа уравнивания осевой и радиальной сил, параметров уплотнительных систем и др., так как в среде жидкого кислорода возможно возгорание элементов насоса при попадании посторонних предметов в полость насоса и нарушении зазоров в роторной части насоса (например, при задевании ротора о корпус).

Выводы по основным результатам работы

1. Представлены расчетные модели и алгоритмы для прогнозирования динамики изменения показателей надежности в процессе проведения этапов комплексной ЭО СТС.

2. Разработаны методы оптимизации объемов испытаний на различных этапах комплексной ЭО СТС.

3. Анализ полученных результатов показывает, что для этапов комплексной ЭО уровни подтверждаемой надежности и объемы испытаний зависят от затрат на проведение испытаний, числа измеряемых параметров и уровней избыточности анализируемых систем.

4. Работоспособность представленных в работе алгоритмов проиллюстрирована на модельных примерах.



Список литературы

1. Галеев А.Г., Золотов А.А., Перминов А.Н., Родченко В.В. Эксплуатация испытательных комплексов ракетно-космических систем. М.: Изд-во МАИ, 2007.
2. Золотов А.А., Титов М.И. Обеспечение надежности транспортных аппаратов космических систем. М.: Машиностроение, 1988.
3. Золотов А.А., Оделевский В.К., Родченко В.В., Черников А.И. Прикладные методы и алгоритмы обеспечения надежности и безопасности технических систем на этапе их разработки и эксплуатации. М.: Изд-во МАИ, 2013.
4. Волков Л.И. Управление эксплуатацией летательных комплексов. М.: Высшая школа, 1987.
5. Гнеденко Б.В. и др. Математические методы в теории надежности. М.: Наука, 1965.
6. Меньшиков В.А., Сухорученков Б.И. Методы мониторинга надежности ракетно-космических систем. М.: НИИ КС, 2006.
7. Грибанов В.Ф., Рембеза А.И., Голиков А.И. и др. Методы отработки научных и народно-хозяйственных ракетно-космических комплексов / Под общ. ред. В.Ф. Грибанова. М.: Машиностроение, 1995.
8. Галеев А.Г., Денисов К.П., Ищенко В.И., Лисейкин В.А., Сайдов Г.Г., Черкашин А.Ю. Испытательные комплексы и экспериментальная отработка жидкостных ракетных двигателей / Под ред. Н.Ф. Моисеева. М.: Машиностроение / Машиностроение-Полет, 2012.

References

1. Galeev A.G., Zolotov A.A., Perminov A.N., Rodchenko V.V. Èkspluataciã ispytatel'nyh kompleksov raketno-kosmièeskikh sistem. M.: Izd-vo MAI, 2007.
2. Zolotov A.A., Titov M.I. Obespeèenie nadežnosti transportnyh apparatov kosmièeskikh sistem. M.: Mašinstroenie, 1988.
3. Zolotov A.A., Odelevskij V.K., Rodchenko V.V., Èčnikov A.I. Prikladnye metody i algoritmy obespeèeniã nadežnosti i bezopasnosti tehnièeskikh sistem na ètape ih razrabotki i èkspluatácii. M.: Izd-vo MAI, 2013.
4. Volkov L.I. Upravlenie èkspluataciej letatel'nyh kompleksov. M.: Vysšãã škola, 1987.
5. Gnedenko B.V. i dr. Matematièeskie metody v teorii nadežnosti. M.: Nauka, 1965.
6. Men'šikov V.A., Suhoruèenkov B.I. Metody monitoringa nadežnosti raketno-kosmièeskikh sistem. M.: NII KS, 2006.
7. Gribanov V.F., Rembeza A.I., Golikov A.I. i dr. Metody otrabotki nauènyh i narodno-hozãjstvennyh raketno-kosmièeskikh kompleksov / Pod obš. red.j V.F. Gribanova. M.: Mašinstroenie, 1995.
8. Galeev A.G., Denisov K.P., Išenko V.I., Lisejkin V.A., Sajdov G.G., Èrkašin A.Û. Ispytatel'nye komplekсы i èksperimental'naã otrabotka židkostnyh raketnyh dvigatelej / Pod red. N.F. Moiseeva. M.: Mašinstroenie / Mašinstroenie-Polet, 2012.

Транслитерация по ISO 9:1995