

7. Китаев А.И., Лукс А.Л., Порядин А.В. Тепловые трубы повышенной тепловой проводимости – как базовые элементы системы терморегулирования в аэрокосмической технике // Вестник СамГУ. 2009. № 3-2(19). С. 98-101.
8. Бирюк В.В., Китаев А.И. Применение тепловых труб для охлаждения РЭА // Вестник СамГУ. 2009. № 3-2(19). С. 342-345.
9. Кулагин В.А., Соколов Н.Ю. Разработка оборудования для тестирования тепловых труб // Журнал СФУ. Техника и технологии. 2015. № 8(6). С. 774-785. DOI: 10.17516/1999-494X-2015-8-6-774-785.
10. Кулагин В.А., Соколов Н.Ю. Численное исследование характеристик тепловых труб в составе радиоэлектронного оборудования космических аппаратов // Журнал СФУ. Техника и технологии. 2015. № 8(6). С. 769-773. DOI: 10.17516/1999-494X-2015-8-6-769-773.
11. Пат. 2403692 Российская Федерация, МПК H05K 1/00, H05K 7/20. Модуль радиоэлектронной аппаратуры с гипертеплопроводящим основанием / Сунцов С.Б., Косенко В.Е., Деревянко В.А.; заявитель и патентообладатель Открытое акционерное общество «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнёва». – №2009116488/07; заявл. 29.04.2009; опубл. 10.11.2010, Бюл. № 31.
12. Чи С. Тепловые трубы: теория и практика. М. : Машиностроение, 1981. 207 с.

УДК 62-192

## **ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ УНИКАЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ НА ОСНОВЕ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО АНАЛИЗА**

Лепихин А.М.<sup>1</sup>, Похабов Ю.П.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт вычислительных технологий СО РАН, Красноярский филиал, г. Красноярск

<sup>2</sup>АО «НПО ПМ – Малое Конструкторское Бюро», г. Железногорск

Значительная доля современных изделий машиностроения относится к классу уникальных, изготавливаемых в единичном экземпляре или малыми партиями. Отличительными особенностями уникальных изделий является критичность и сложность выполняемых задач, особая среда функционирования, малое число однотипных узлов и систем. Как правило, для этих изделий устанавливаются длительные сроки службы и высокие требования к надежности. В то же время оценка показателей надежности уникальных изделий остается практически и теоретически нерешенной задачей. Более того, существует устойчивое мнение, что такая оценка в рамках современной теории надежности невозможна, поскольку нет возможности получения необходимой статистической информации. Вследствие этого надежность уникальных изделий постулируется как высокая, обеспечиваемая качеством конструкторских и технологических решений. Количественные оценки показателей надежности обычно не проводятся.

В работе [1] была указана принципиальная разрешимость указанной выше проблемы в виде оценки индивидуальной надежности изделий. Информационной основой для ее решения полагается не статистическое рассеяние конструктивно-технологических параметров, оценка которых требует анализа представительной выборки, а метрологическая погрешность измерений этих параметров в процессе создания уникального изделия. При таком подходе необходимые статистические данные могут быть собраны в ходе проектирования, изготовления и испытаний изделия. В данном

докладе рассматриваются некоторые методические аспекты указанного подхода к оценке надежности уникальных изделий.

Проектирование изделий заключается в выборе конструктивно-технологических решений, удовлетворяющих заданной системе ограничений [2]:

– параметрических (геометрические размеры деталей, зазоры, допуски, посадки, нагрузки и т.п.)

$$\underline{\alpha} \leq \alpha_i \leq \bar{\alpha}, \quad i = 1, n; \quad (1)$$

– функциональных (производительность, мощность, скорость, грузоподъемность и т.п.)

$$\underline{\varphi}(\alpha) \leq \varphi_j(\alpha) \leq \bar{\varphi}(\alpha), \quad j = 1, m; \quad (2)$$

– критериальных (прочность, устойчивость, долговечность, безотказность, безопасность и т.п.)

$$\underline{\Phi}(\alpha) \leq \Phi_k(\alpha) \leq \bar{\Phi}(\alpha), \quad k = 1, l. \quad (3)$$

Параметры  $\alpha = \{\alpha_i\}$  устанавливаются при конструктивно-технологическом проектировании изделий. Их значения могут быть получены путем прямых измерений. Функциональные  $\varphi = \{\varphi_j\}$  и критериальные  $\Phi = \{\Phi_k\}$  характеристики устанавливаются при разработке изделий и испытаниях конструкционных материалов, узлов, агрегатов и изделий, на основе косвенных измерений и расчетов. Границы допустимых интервалов параметров  $[\underline{\alpha}, \bar{\alpha}]$ , функциональных  $[\underline{\varphi}, \bar{\varphi}]$  и критериальных  $[\underline{\Phi}, \bar{\Phi}]$  характеристик задаются на основе прошлого опыта, теоретических положений и предварительных расчетных оценок.

Указанные функциональные и критериальные ограничения могут быть отображены на параметрическое пространство  $\Omega_\alpha$  в виде  $\alpha_\varphi \in [\underline{\alpha}_\varphi, \bar{\alpha}_\varphi]$ ,  $\alpha_\Phi \in [\underline{\alpha}_\Phi, \bar{\alpha}_\Phi]$ . Здесь  $\alpha_\varphi$  и  $\alpha_\Phi$  – соответствующие значения конструктивно-технологических параметров, определенные из условий обеспечения заданных функций и критериев. В общем случае границы  $(\underline{\alpha}, \bar{\alpha})$ ,  $(\underline{\alpha}_\varphi, \bar{\alpha}_\varphi)$ ,  $(\underline{\alpha}_\Phi, \bar{\alpha}_\Phi)$  следует рассматривать как случайные переменные с заданными функциями плотностей распределения вероятностей  $f(\alpha)$ ,  $f(\alpha_\varphi)$ ,  $f(\alpha_\Phi)$ . Следует отметить, что фактические средние  $\langle \alpha \rangle$  и граничные  $\underline{\alpha}, \bar{\alpha}$  значения могут быть связаны с критериальными значениями  $\underline{\alpha}_\Phi, \bar{\alpha}_\Phi$  коэффициентами запаса  $\gamma$  (рис. 1):

Аналогичные соотношения можно записать и для параметров  $\alpha_\varphi$ .

Указанные ограничения и условия определяют области  $\Omega_\alpha$ ,  $\Omega_\varphi$ ,  $\Omega_\Phi$  допустимых значений конструктивно-технологических параметров с границами  $\Gamma_\alpha$ ,  $\Gamma_\varphi$ ,  $\Gamma_\Phi$  (рис. 2)

$$\begin{aligned} \Omega_\alpha &= \{\alpha | \underline{\alpha} \leq \alpha_i \leq \bar{\alpha}, \}, \\ \Omega_\varphi &= \{\alpha | \underline{\alpha}_\varphi \leq \alpha_\varphi \leq \bar{\alpha}_\varphi, \}, \\ \Omega_\Phi &= \{\alpha | \underline{\alpha}_\Phi \leq \alpha_\Phi \leq \bar{\alpha}_\Phi \} \end{aligned} \quad (4)$$

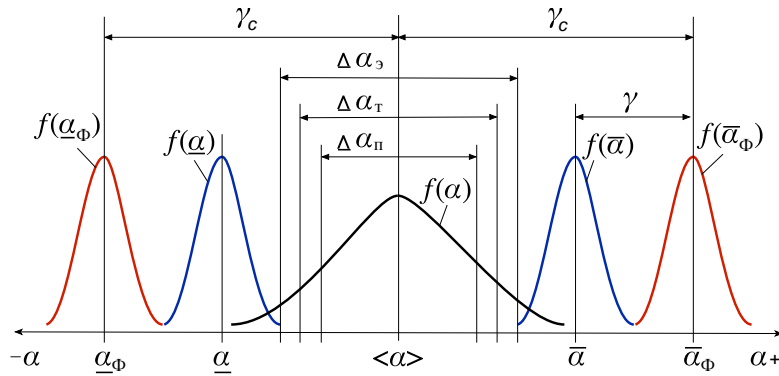


Рис. 1. Схема интервалов параметрических ограничений

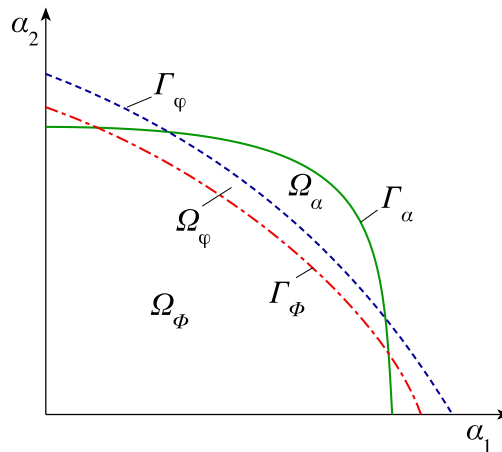


Рис. 2. Схема формирования областей допустимых состояний

С учетом рассмотренной схемы вероятность безотказной работы изделия можно сформулировать в классическом виде, как вероятность нахождения параметров в допустимой области [1, 3]

$$R(\alpha, \tau) = P\{\alpha(\tau) \in \Omega_S(\alpha, \tau), \tau \in [0, t]\}, \quad (5)$$

где  $\tau$  – рассматриваемый момент времени (стадия жизненного цикла);  $t$  – заданный срок службы;  $\Omega_S$  – область безотказных состояний изделия, определяемая как пересечение указанных областей,  $\Omega_S = \Omega_\alpha \cap \Omega_\phi \cap \Omega_F$ .

Как отмечалось выше, сложность решения задачи (5) заключается в необходимости исходной статистической информации по всем рассматриваемым параметрам в заданном интервале времени. Учитывая, что в данном случае рассматриваемые моменты времени  $\tau$  связаны с конкретными стадиями жизненного цикла изделия, используем консервативную ступенчатую аппроксимацию изменения допустимой области  $\Omega_S$  во времени. Тогда вместо (5) можно записать следующее выражение для вероятности безотказной работы

$$R(\alpha, \tau) = \prod_i P_i\{\alpha(\tau) \in \Omega_i(\tau, \alpha), \tau_{i-1} \leq \tau \leq \tau_i | \alpha(\tau) \in \Omega_k(\tau, \alpha), \tau_{i-1} \leq \tau \leq \tau_k\} \quad (6)$$

Выражение (6) позволяет перейти к более простой конструкции задачи, а именно – к последовательной схеме оценки вероятностей пребывания конструктивно-технологических параметров в соответствующих рассматриваемым стадиям допустимых областях  $\Omega_\alpha, \Omega_\phi, \Omega_F$

$$R(\alpha, \tau) = \prod_i P_i\{\alpha(\tau) \in \Omega_i(\tau), \tau_{i-1} \leq \tau \leq \tau_i\} \approx P_\alpha P_\varphi P_\Phi, \quad (7)$$

где  $P_\alpha = P\{\alpha \in \Omega_\alpha\}$ ,  $P_\varphi = P\{\alpha \in \Omega_\varphi\}$ ,  $P_\Phi = P\{\alpha \in \Omega_\Phi\}$ .

Исходная информация о конструктивных параметрах  $\alpha$  и характеристиках  $\varphi$  и  $\Phi$  для решения задачи (7) может быть получена в результате анализа требований к изделию, системного, функционального и параметрического анализа изделия [4]. При анализе требований определяются концептуальные отношения множеств параметров, функций и критериев работоспособности изделия. В процессе системного анализа устанавливаются определяющие множества параметров, функций и критериев работоспособности изделия. При функциональном анализе уточняются функции и параметрические множества, обеспечивающие их выполнение. На стадии параметрического анализа устанавливаются диапазоны возможных изменений параметров, при которых удовлетворяются функциональные и критериальные ограничения. Таким образом, формируется база исходной информации, на которой могут быть получены исходные оценки вероятностей (7), характеризующих надежность изделия [5, 6].

При изготовлении изделия, как правило, проводятся предусмотренные конструкторской документацией метрологические измерения и неразрушающий контроль. В результате чего измеряются значения конструктивно-технологических параметров  $\alpha$ , что позволяет уточнить оценку вероятности  $P_\alpha$ . Помимо указанного, при создании изделий проводятся испытания конструкционных материалов, испытания узлов и агрегатов, что позволяет уточнить критериальные  $\{\alpha_\Phi\}$  и функциональные  $\{\alpha_\varphi\}$  параметры. Это позволяет уточнить оценки вероятностей  $P_\varphi$  и  $P_\Phi$ .

Особую роль в оценке индивидуальной надежности изделий могут играть активно развивающиеся методы виртуальных испытаний. Виртуальные испытания, призваны прежде всего уменьшить общее количество «реальных» испытаний, снизив, таким образом, затраты финансовых и временных ресурсов на отработку уникальных изделий. Виртуальные испытания реализуются на основе разработки «цифрового двойника» изделия с использованием программных конечно-элементных пакетов 3D-моделирования – Autodesk Inventor 2014 и Solid Works 2014, а также пакетов инженерного анализа – COSMOS\Works и ANSYS [7, 8]. Основное достоинство виртуальных испытаний в рассматриваемом контексте заключается в том, что они позволяют проводить многократный анализ работоспособности изделия при варьировании значений базисных переменных.

После изготовления изделий обычно проводятся стендовые, приемо-сдаточные и другие виды испытаний. Стендовые испытания позволяют провести дальнейшее уточнение критериальных  $\{\alpha_\Phi\}$  и функциональных  $\{\alpha_\varphi\}$  параметров, с соответствующими расчетными оценками вероятностей  $P_\varphi$  и  $P_\Phi$ . Приемо-сдаточные испытания фактически направлены на подтверждение и уточнение полученных оценок  $P_\varphi$  и  $P_\Phi$ . Таким образом, последовательный анализ изделия, с выполнением соответствующих расчетно-экспериментальных оценок вероятностей нахождения параметров в заданных пределах по схеме  $R_\alpha \rightarrow R_\varphi \rightarrow R_\Phi$ , обеспечивает возможность оценки индивидуальной надежности  $R(\alpha, 0)$  с использованием информации, относящейся непосредственно к данному изделию. На стадии эксплуатации изделия могут проводиться непрерывные или периодические измерения параметров  $\alpha(\tau)$ . Эти измерения будут дополнять и уточнять имеющуюся базу данных о конструктивно-технологических параметрах изделия. На этой информационной базе могут быть выполнены оценки вероятности безотказной работы  $R(\alpha, \tau)$  в заданный момент времени эксплуатации.

## Литература

1. Тимашев С.А. Инфраструктуры. В 2-х частях. Том 1. Надежность и долговечность. Екатеринбург : Изд-во НИСО УрО РАН, 2016. 530 с.
2. Соболев И.М., Статников Р.Б. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями. М. : Наука, 1981. 110 с.
3. Болотин В.В. Ресурс машин и конструкций. М. : Машиностроение, 1990. 448 с.
4. Похабов Ю.П. Теория и практика обеспечения надёжности механических устройств одноразового срабатывания. Красноярск : СФУ, 2018. 340 с.
5. Шпете Г. Надежность несущих строительных конструкций. М. : Стройиздат, 1994. 288 с.
6. Вероятностный риск-анализ конструкций технических систем / А.М. Лепихин, Н.А. Махутов, В.В. Москвичев, А.П. Черняев. Новосибирск : Наука, 2003. 174 с.
7. Алямовский А.А. Solid Works/COSMOSWorks. Инженерный анализ методом конечных элементов. М. : ДМК Пресс, 2004. 432 с.
8. Богомоллов М.В. Виртуальные испытания изделий // Электронный журнал «Труды МАИ». Выпуск 38 /[www.mai.ru/science/trudy/](http://www.mai.ru/science/trudy/)

УДК 539.4:519.2

### РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ПРОЧНОСТИ, НАДЕЖНОСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Махутов Н.А.<sup>1</sup>, Лепихин А.М.<sup>2</sup>, Чернякова Н.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт машиноведения имени А.А. Благонравова РАН, г. Москва

<sup>2</sup>Институт вычислительных технологий СО РАН, Красноярский филиал, г. Красноярск

Значительная доля технических систем эксплуатируется в экстремальных природно-климатических условиях Сибири и Крайнего Севера. К таким системам и их конструкциям предъявляются повышенные требования работоспособности, определяемые показателями прочности, надежности и безопасности. К настоящему времени сложилась многоуровневая концепция обеспечения работоспособности технических систем [1, 2]. Она включает специфические этапы, требования, критерии, расчетные параметры и направления развития (рис. 1). На первых этапах методология расчетно-экспериментального обоснования работоспособности основывалась на детерминированных методах, с элементами статистического анализа (этапы I-III). Осознание роли случайных факторов в нарушении работоспособности привело к использованию вероятностных методов моделирования и анализа (этапы IV, V). С созданием сложных, энергонасыщенных технических систем в анализ работоспособности стали вводиться параметры безопасности  $S$  и риска  $R$  аварий и катастроф с учетом природных, техногенных и антропогенных факторов (этапы VI, VII). На этой основе, к концу XX века сформировался комплекс взаимосвязанных многоуровневых детерминированных и вероятностных требований к параметрам работоспособности технических систем: прочность  $R_{\sigma}$  → жесткость  $R_{\delta}$  → устойчивость  $R_{\lambda}$  → ресурс  $R_N, \tau$  → надежность  $P_{P,R}$  → живучесть  $L_{d,l}$  → безопасность  $S$ . Необходимо отметить, что каждому этапу развития фундаментальных исследований в этой структуре соответствует определенный практический результат в проектировании, создании и эксплуатации технических систем: нераз-