

## Некоторые выводы по результатам применения конструкторско-технологического анализа надежности для изделий ракетно-космического назначения. Часть 2

© Ю.П. Похабов

АО «НПО ПМ — Малое Конструкторское Бюро»,  
Железногорск, Красноярский край, 662972, Россия

*Обобщены результаты использования процедур конструкторско-технологического анализа надежности (КТАН) механизмов одноразового срабатывания поворотных конструкций космических аппаратов (далее — механизмов). Приведены принципы проектирования механизмов, примеры установления требований конструкторской документации при их проектировании. Показаны различия между процессами проектирования и конструирования механизмов, даны примеры конструкторско-технологических факторов, способных привести к потенциальным отказам таких механизмов. Рассмотрены принципы обоснования работоспособности и надежности бортового оборудования космических аппаратов. Представлены общность и различия в обосновании работоспособности и надежности механизмов и остального бортового оборудования космических аппаратов. В результате применения КТАН выявлено, что не существует различных по форме методов обоснования работоспособности и надежности изделий разного назначения, разнообразно лишь содержание инженерных задач, обеспечивающих выполнение их служебного назначения. Причем верификация решения таких задач может быть выполнена с помощью формализованных процедур конструкторско-технологического анализа надежности.*

**Ключевые слова:** конструкторско-технологический анализ надежности (КТАН), изделия ракетно-космического назначения, надежность, отказ, ошибки проектирования

**Введение.** Сравнительно новым инструментом аналитической верификации высокоответственных изделий ракетно-космического назначения [1] является конструкторско-технологический анализ надежности (КТАН). Конечная цель его применения — повышение качества конструкторской документации как набора конкретных требований к изготовлению и эксплуатации изделия, в связи с чем конструктор должен уметь:

- принимать инженерные решения, обеспечивающие выполнение требуемых функций разрабатываемым изделием;
- выбирать параметры конструкции и обосновывать выбор их значений, необходимых для обеспечения заданных работоспособности и надежности, исходя из законов механики (из курсов инженерных дисциплин) и конструкторско-технологических решений;
- устанавливать необходимые и достаточные требования конструкторской документации для изготовления и эксплуатации изделий на основе выбранных и обоснованных параметров конструкции;

• обеспечивать соблюдение принципов единства целей при установлении, обосновании, выполнении и подтверждении (контроле) требований, задаваемых в конструкторской документации.

Решение вышеперечисленных задач является прерогативой конструкторов, причем это скрыто от внимания третьих лиц вследствие приватности процессов разработки. Однако от достоверности и эффективности решений, принятых и обоснованных конструктором, зависит содержание требований конструкторской документации, которые с того момента, как они будут установлены, станут для всех участников производственной деятельности, включая и непосвященных в причины их появления, обязательными для выполнения. Объем и номенклатура таких требований в каждой конкретной конструкции всегда разные, но принципы их установления и обоснования могут быть формализованы и открыты третьим лицам с помощью процедур конструкторско-технологического анализа надежности, начиная с ранних стадий разработки.

В качестве примера установления и обоснования требований конструкторской документации далее приведены результаты анализа с применением КТАН для механизмов одноразового срабатывания поворотных конструкций космических аппаратов (далее — механизмов) [2–6]. Причем практика использования методики КТАН показывает, что принципы установления и обоснования требований конструкторской документации могут быть использованы и для любого бортового оборудования, не относящегося к механизмам.

Цель данной работы — на основе применения методики КТАН показать общность и различия обоснования работоспособности и надежности механизмов и остального бортового оборудования космических аппаратов (КА), что может оказаться интересным и полезным для конструкторов и специалистов по обеспечению качества и надежности ракетно-космической техники.

**Принципы проектирования механизмов.** В основе проектирования и конструирования механизмов лежат законы механики деформируемого твердого тела, обеспечивающие требуемые условия прочности:

$$S > N, \quad (1)$$

где  $S$ ,  $N$  — действительные значения несущей способности конструкции и внешних нагрузок в сложном положении.

При этом любое расширение функциональных возможностей механизмов, помимо прочности (например, по складыванию в заданный объем, преобразованию движений тел в системе, точности, жесткости и пр.), рассматриваются как условия и ограничения, которые должны быть обеспечены. В частности, при проектировании механизмов

выполнение *условий прочности в сложенном положении* (1) осуществляют с учетом выбора параметров конструктивно-компоновочных и конструктивно-силовых схем, которые обеспечивают заданные значения по ряду условий и ограничений, включающих:

- требуемую компактность складывания конструкций в сложенном положении при обеспечении критериев укладки в зоне полезного груза с учетом возможных деформаций под действием внешних нагрузок на участке выведения:

{соблюдение *условий и ограничений по зоне полезного груза*}; (2)

- установленные зоны и схемы раскрытия конструкций из стартового в рабочее положение с учетом ограничений со стороны смежных конструкций, например для того, чтобы исключить зацепление поворотных конструкций и возмущающих воздействий на бортовое оборудование, в частности закрутки, как последствия процесса раскрытия:

{соблюдение *условий и ограничений по зоне раскрытия в рабочее положение*}; (3)

- заданные геометрические размеры и конфигурацию конструкции в рабочем положении:

{соблюдение *условий и ограничений в рабочем положении*}; (4)

- необходимые запасы прочности конструкции в зависимости от использования числа замков зачекочки  $m$  при закреплении ее к опорному основанию в сложенном положении исходя из принципа равнопрочного проектирования, в соответствии с которым надежность удержания  $P_y$  (функция несущей способности закрепляемой конструкции  $S$  от числа замков  $m$  и внешней нагрузки  $N$ ) обеспечивается близкой к надежности освобождения конструкции  $P_{cp}$  (вероятность последовательного срабатывания  $m$  замков):

$$\begin{aligned} P_y &\approx P_{cp}, \\ P_y &= P[S(m) > N], \\ P_{cp} &= \prod_{i=1}^m P_i; \end{aligned} \quad (5)$$

- допустимые парциальные частоты собственных колебаний в сложенном положении  $p$  по отношению к частотам внешних динамических воздействий  $p_{рез}$  (например, при расцепке ступеней ракеты-носителя) для исключения резонанса:

$$p \notin p_{рез}; \quad (6)$$

• минимальные значения парциальных частот собственных колебаний в рабочем положении  $p_{\min}$  по отношению к допустимым значениям  $p_{\text{доп}}$ , накладываемым со стороны системы управления КА на орбите:

$$p_{\min} > p_{\text{доп}}. \quad (7)$$

После выполнения условий прочности (1) с учетом одновременного удовлетворения условий и ограничений (2)–(7) определяют силовую основу раскрывающихся конструкций, в которую затем встраивают приводы, характеристики которых обеспечивают требуемые процессы раскрытия в рабочее положение.

Выбор крутящих (линейных) приводов осуществляют исходя из обеспечения движущих моментов (сил), которые они должны развивать для выполнения условий перевода конструкций из сложенного положения в рабочее:

$$\begin{aligned} M_{\text{дв}} &> M_{\text{с}}, \\ N_{\text{дв}} &> R_{\text{с}}, \end{aligned} \quad (8)$$

где  $M_{\text{дв}}(N_{\text{дв}})$  — действительное значение движущего момента (движущих сил) на приводе;  $M_{\text{с}}(R_{\text{с}})$  — действительное значение момента сил сопротивления (резистивных сил) в шарнирных узлах.

Согласно сложившейся практике, проектирование механизмов выполняют в определенной последовательности:

- обеспечивают прочность конструкции в сложенном положении (1) с учетом условий и ограничений (2)–(7) как первооснову ее работоспособности;
- выбирают приводы, исходя из их энергодостаточности, обеспечивающей способность конструкции раскрываться в рабочее положение (8), и принципиальной осуществимости процессов изменения конфигурации согласно заранее определенному алгоритму (3);
- проверяют прочность конструкции при раскрытии с учетом характеристик выбранных приводов:

$$S > N_{\text{дин}}, \quad (9)$$

где  $N_{\text{дин}}$  — динамическая нагрузка при мгновенной остановке поворотной конструкции после срабатывания фиксаторов конечного положения.

Для выполнения условия прочности при раскрытии (9), в зависимости от целей решаемых задач, дополнительно могут быть: проведены расчеты параметров раскрытия поворотных звеньев (времени, скоростей и ускорений); обеспечены условия упорядочивания отно-

сительных перемещений конструкций при раскрытии (движения без ударов и зацеплений); обоснованы критерии несоударения раскрываемых конструкций посадочных модулей о твердую поверхность (допустимые перемещения свободных частей консолей) и т. п. [7–9].

**Установление требований конструкторской документации при проектировании.** Поскольку в основе проектирования изделий лежит принцип избыточности, позволяющий исключить (или снизить) факторы неопределенности между «необходимой» структурой изделия и «случайностью» внешних факторов среды [10], значения параметров конструкции механизмов при проектировании с учетом выполнения условий (1)–(9) определяют по расчетным значениям внешних воздействий:

$$S^{\text{расч}} > N^{\text{расч}}, \quad (10)$$

$$M_{\text{дв}}^{\text{расч}} > M_{\text{с}}^{\text{расч}}, \quad (11)$$

$$N_{\text{дв}}^{\text{расч}} > R_{\text{с}}^{\text{расч}},$$

$$S^{\text{расч}} > N_{\text{дин}}^{\text{расч}}. \quad (12)$$

Здесь  $S^{\text{расч}}$  — расчетная несущая способность;  $N^{\text{расч}}$  — расчетное значение нагрузки в сложенном положении,  $N^{\text{расч}} = nfN$ ;  $M_{\text{дв}}^{\text{расч}}$  — расчетное значение движущего момента;  $M_{\text{с}}^{\text{расч}}$  — расчетное значение момента сопротивления раскрытию,  $M_{\text{с}}^{\text{расч}} = kM_{\text{с}}$ ;  $N_{\text{дв}}^{\text{расч}}$  — расчетное значение движущих сил,  $N_{\text{дв}}^{\text{расч}} = kN_{\text{дв}}$ ;  $R_{\text{с}}^{\text{расч}}$  — расчетное значение резистивной силы,  $R_{\text{с}}^{\text{расч}} = kR_{\text{с}}$  ( $k$  — запас движущего момента (сил));  $N_{\text{дин}}^{\text{расч}}$  — расчетное значение динамической нагрузки при раскрытии,  $N_{\text{дин}}^{\text{расч}} = nfN_{\text{дин}}$  ( $n$  — запас прочности,  $f$  — коэффициент безопасности).

Выражения (10)–(12) используют для выбора значений параметров конструкции с учетом того, что их критические (предельные) значения, характеризующие способность сопротивляться возникновению нежелательных событий (отказам) под действием внешних факторов, будут соответствовать избыточности конструкции с приемлемым доверительным уровнем безотказной работы [11, 12]. При этом значения коэффициентов безопасности для ракетно-космических изделий выбирают из ГОСТ Р 56514–2015, значения запасов прочности чаще всего определяют в техническом задании на проектирование, значения запасов движущих моментов (сил) для механизмов ракетно-космического назначения в России задают исходя из практики применения,

а за рубежом устанавливают исходя из требований стандартов, например NASA-STD-5017A или ECSS-E-ST-33-01C.

С учетом (10) и (12) конструктор выбирает требуемые модули упругости и пределы прочности конструкционных материалов, характеристики поперечных сечений (площади, главные моменты инерции, моменты сопротивления) силовых элементов и соответствующие сортаменты профиля поперечных сечений, а с учетом (11) — силовые характеристики и тип привода для поворота конструкции.

Значения указанных параметров нужны конструктору для установления требований в конструкторской документации; это — необходимые при изготовлении марки конструктивных материалов, сортаменты заготовок, геометрические размеры поперечных сечений и допуски на отклонения размеров поперечного сечения, типы приводов и прочая информация, соответствующая его замыслу и расчетам. Все номинальные значения параметров конструкции устанавливают на основе принципов унификации, типизации и стандартизации конструктивных элементов изделий. Поскольку производственный персонал не посвящен в замысел и расчеты конструктора, такие требования являются обязательными для выполнения, чтобы были достигнуты заданные работоспособность и надежность изделий, которые задумал и обеспечение которых осуществил конструктор. Дополнять, изменять или не выполнять что-либо из этих требований производственный персонал не имеет права (по крайней мере, без одобрения конструктора после дополнительного обоснования).

**Различия процессов проектирования и конструирования механизмов.** Согласно методу расчета надежности механических частей конструкции летательных аппаратов в различных предельных состояниях фиктивных элементов, разработанного под руководством А.А. Кузнецова [13, 14], надежность механизмов по предельным состояниям прочности и функционирования при раскрытии определяется соотношением

$$R = R_{\text{пр}} R_{\text{ф}}, \quad (13)$$

где  $R_{\text{пр}}$  — надежность по прочности в сложенном положении с учетом (1)–(7) и (10),  $R_{\text{пр}} = P(S > N^{\text{расч}})$ ;  $R_{\text{пр}}$  — надежность по прочности при раскрытии с учетом (9) и (12),  $R_{\text{пр}} = P(S > N_{\text{дин}}^{\text{расч}})$ ;  $R_{\text{ф}}$  — надежность по функционированию,  $R_{\text{ф}} = P(M_{\text{дв}} > M_{\text{с}}^{\text{расч}})$ , или надежность по функционированию при раскрытии с учетом (8) и (11),  $R_{\text{ф}} = P(N_{\text{дв}} > R_{\text{с}}^{\text{расч}})$ .

Как показывает практика [2, 15], расчеты по формуле (13) дают проектный (ожидаемый) уровень надежности  $R_{\Pi}$ :

$$R(R_{\text{пр}}, R_{\text{ф}}) = R_{\Pi}. \quad (14)$$

Это обусловлено тем, что при проведении конструкторской и технологической подготовки производства, а также в процессе изготовления механизмов ожидаемая надежность (14) может снижаться из-за конструкторских, технологических и производственных факторов, влияющих на возникновение отказов. Допустим, что работоспособность механизмов, помимо обеспечения параметров прочности (1) либо (10) и раскрытия (8) либо (11), зависит от ряда параметров  $X_i \forall i = (\overline{1, n})$ , связанных с конструкторскими, технологическими и производственными ошибками  $\delta_i$ . В этом случае вероятность возникновения таких ошибок характеризует надежность  $R(X_i) = R(\delta_i)$ , связанную с проектной надежностью  $R_{\Pi}$  (14) функцией  $\phi$  и влияющую на полную надежность механизмов  $R_{\text{м}}$ :

$$R_{\text{м}} = \phi[R_{\Pi}, R(X_i)]. \quad (15)$$

Если предположить, что проектирование, конструирование, технологическая подготовка и производство механизмов в организации осуществляют разные люди (коллективы людей), то проектная надежность  $R_{\Pi}$  и надежность  $R(X_i)$ , связанная с конструкторскими, технологическими и производственными ошибками, являются независимыми величинами, что позволяет представить формулу (15) в виде

$$R_{\text{м}} = R_{\Pi} R(X_i). \quad (16)$$

Из (16) следует, что если конструкторы, технологи и производственный персонал не допустят ошибок в своей работе, то

$$R(X_i) = 1 \Rightarrow R_{\text{м}} = R_{\Pi}. \quad (17)$$

В противном случае параметры  $X_i$ , обусловленные конструкторскими, технологическими и производственными ошибками, будут оказывать влияние на значение показателя надежности (16) подобно параметрам прочности и функционирования при раскрытии.

Таким образом, помимо обеспечения прочности (выбора конструкционных материалов и поперечных сечений силовых элементов) и функционирования при раскрытии (выбора типа и характеристик приводов) следует выявлять и выполнять условия обеспечения

надежности функционирования механизмов, связанные с конструкторско-технологическими факторами в виде:

- изменения состояний конструкции из-за недопустимых сочетаний допусков на геометрические размеры;
- отклонений от точности форм и взаимного расположения рабочих и базовых поверхностей;
- разбросов физико-механических характеристик конструкционных и вспомогательных материалов;
- неблагоприятных комбинаций режимов и условий применения;
- антропогенных воздействий при сборке механизмов (монтаже, настройках и регулировках);
- факторов, чувствительных к технологической наследственности;
- прочих явлений, условий и ограничений, обусловленных конструкторско-технологическими решениями.

Взаимосвязь трех групп факторов (прочности, функционирования при раскрытии и надежности функционирования), влияющая в конечном итоге на работоспособность и надежность механизмов, приведена на рисунке.

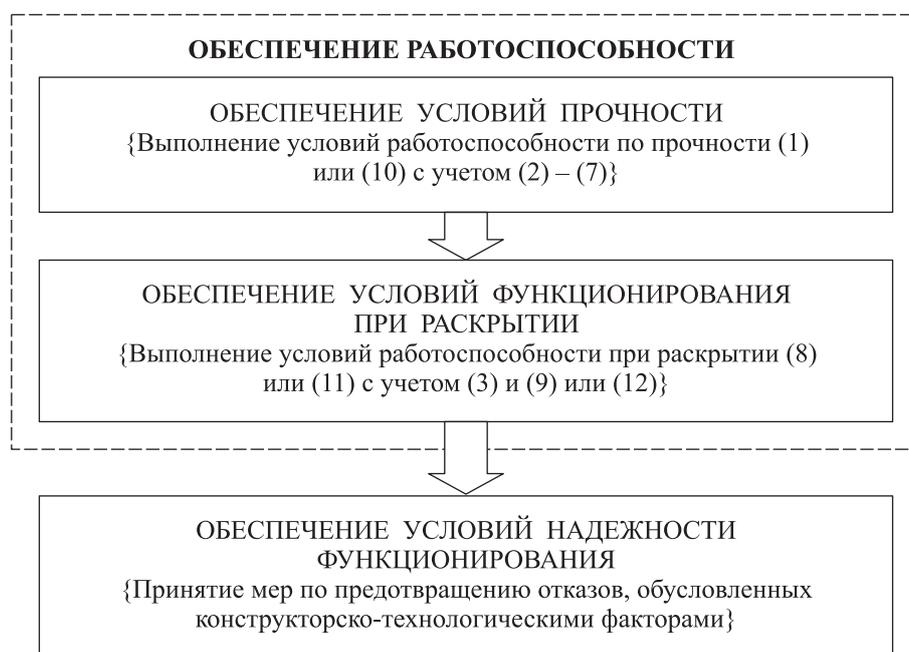


Схема обеспечения работоспособности и надежности механизмов

Выполнение условий работоспособности и надежности механизмов, приведенных на рисунке, обеспечивают методами аналитической верификации, согласно которым:

- на этапе проектирования (на основании укрупненных конструкторских решений без детальной конструкторско-технологической

проработки критичных элементов) все расчеты проводят с учетом различного рода допущений, которые подстраивают математические модели изделий под вероятностно-статистические или инженерные методы расчета;

- на этапе конструирования (при детализации и уточнении проектных решений) результаты проектных расчетов уточняют с учетом принятых конструкторских и технологических решений, влияющих на риски возникновения потенциальных отказов.

Для механизмов, безотказность функционирования которых должна асимптотически приближаться к единице, неучет любого из конструкторских или технологических факторов при разработке и изготовлении может привести к отказу, что следует из условия (13) и подтверждается летной практикой [2, гл. 2].

**Примеры конструкторско-технологических факторов, способных привести к потенциальным отказам механизмов.** Исходя из практики, помимо нарушения условий работоспособности — потери несущей способности механизмов на участке полета (1)–(7) или при раскрытии (9), а также нераскрытия вследствие недостатка энергии приводов (8), отказы могут быть вызваны следующими факторами, подтвержденными практикой космических запусков [2–4]:

- недопустимыми изменениями взаимоположения деталей механизма при вибрациях активного участка, способными нарушить его срабатывание (недостаточная вибростойкость);

- нарушениями твердого смазывающего слоя в трибосопряжениях (например, вследствие фреттинг-коррозии), способными привести к потере подвижности в высоконагруженных элементах конструкции механизмов в вакууме (холодная сварка);

- попаданием в механизмы посторонних предметов, что может вызвать блокировку их раскрытия;

- несрабатыванием пиротехнических средств, механическими обрывами электрических цепей или окислением контактов инициирующих устройств механизмов;

- неправильной регулировкой исполнительных элементов механизмов (например, неучетом возможных перемещений под действием гравитации при проведении сборочных работ);

- заклиниванием подвижных элементов замка вследствие монтажных и/или тепловых деформаций;

- возникновением внезапных помех на пути движения подвижных звеньев поворотных конструкций (например, при недопустимом взаимном расположении смежных конструкций или изменении динамических размеров конструктивных элементов в невесомости) и т. п.

При разработке конструкторской документации все указанные факторы, способные привести к потенциальным отказам, должны быть

учтены путем выбора свойств критичных элементов конструкции, которые исключают или смягчают потенциальные отказы. Для того чтобы достичь заданных свойств критичных элементов, конструктор устанавливает требования в конструкторской документации, которые должны быть выполнены при изготовлении, а их выполнение должно быть подтверждено службой технического контроля на соответствие требованиям конструкторской документации.

Опыт применения КТАН для механизмов показывает, что процедуры проектирования и конструирования могут быть формализованы и целенаправленно реализованы на каждой стадии жизненного цикла, а эффективность результата определяется исключительно квалификацией инженеров, использующих методику такого анализа. Безусловное преимущество использования КТАН — возможность системного (сплошного) анализа свойств критичных элементов на инженерном уровне понимания и принятия решений, их целевого обоснования расчетно-экспериментальными методами, а также возможность установления необходимых и достаточных требований к изготовлению и контролю для подтверждения и реализации свойств критичных элементов, заданных конструктором.

**Принципы обоснования работоспособности и надежности бортового оборудования космических аппаратов.** В силу узкопрофессиональных интересов автора, КТАН разрабатывался для анализа механизмов, и использование его для других технических систем изначально не предполагалось. Однако обстоятельства (преподавательская, консультационная и экспертная деятельность) вынудили опробовать возможности КТАН для обоснования работоспособности и надежности бортового оборудования КА. Выяснилось, что схему обеспечения работоспособности и надежности механизмов, представленную на рисунке, можно рассматривать как универсальную, пригодную для любых изделий с различными физическими принципами действия: механическими, тепловыми, пиротехническими, электромеханическими, электрическими, электронными и т. п. Разница заключается лишь в соблюдении условий функционирования изделий: для механизмов — это преобразование кинетической и потенциальной энергий, для пиротехнических устройств — создание требуемого давления пороховых газов, для электрических устройств — передача или преобразование электрического тока, для электронных систем — прием, обработка и передача электрических сигналов и т. д.

Для изделий любого назначения в основе работоспособности и надежности лежат единые принципы обеспечения:

- прочности по законам механики деформированного твердого тела;

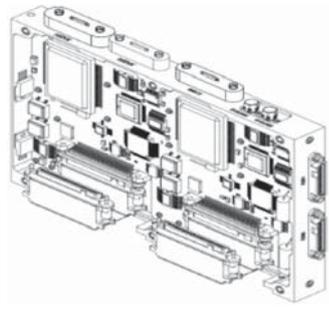
- функционирования для преобразования энергии согласно физическим законам и закономерностям;
- конструкторско-технологических факторов, позволяющих сохранять прочность и функционирование в течение заданного времени.

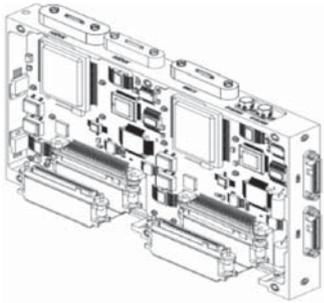
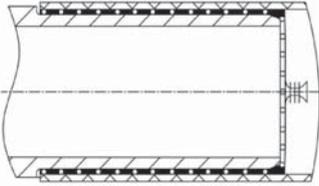
Исходя из принципов обеспечения работоспособности и надежности изделий, конструкторы:

- при проектировании устанавливают и обосновывают проектные (ожидаемые) параметры, обеспечивающие выполнение условий прочности и функционирования в соответствии со служебным назначением;
- при разработке рабочей конструкторской документации принимают меры по обеспечению их стабильности (робастности) в течение жизненного цикла изделия, т. е. к недопущению конструкторских, технологических и производственных ошибок  $\delta_i$ , способных привести к нарушению заданных показателей надежности.

Примеры анализа работоспособности и надежности бортового оборудования, не относящегося к механизмам, приведены в таблице.

**Анализ выполнения изделиями условий работоспособности и надежности**

	Модуль радиоэлектронной аппаратуры	Клеевое соединение трубы и фитинга
Обеспечиваемые условия		
Работоспособность по прочности	Подтверждение требуемых запасов прочности механических соединений электрорадиоизделий и корпуса (физическими методами)	Подтверждение требуемых запасов прочности клеевого слоя и соединяемых деталей (физическими методами)
Работоспособность по функционированию	Применение электрорадиоизделий и схем их соединения для выполнения приема, обработки и передачи электрических сигналов с заданной надежностью (статистическими методами)	Не требуется
Надежность с учетом конструкторско-технологических факторов	Соблюдение качества выполнения паяных электрических соединений;	Подготовка поверхностей склеиваемых деталей; снижение зон непрочекля;

Обеспечиваемые условия	Модуль радиоэлектронной аппаратуры 	Клеевое соединение трубы и фитинга 
Надежность с учетом конструкторско-технологических факторов	подтверждение технологии изготовления печатных плат (рисунков дорожек и контактных площадок); обеспечение нормальных тепловых режимов работы электрорадиоизделий для худших случаев, отличных от требований технических условий по температурам посадочных поверхностей	проведение контрольных испытаний клея на разрушение; применение конструктивных приемов, снижающих риски возникновения продольных трещин клеевого слоя при термоциклировании

Согласно данным таблицы, следует, что для бортового оборудования КА, помимо обеспечения условий прочности и функционирования, необходимо выявлять возможные конструкторско-технологические ошибки, которые можно, в отличие от физических дефектов в реальных изделиях, просто устранить, либо можно снизить негативные последствия инженерными методами задолго до их изготовления. Обнаружение и предупреждение таких ошибок относится к одной из задач конструкторской деятельности по предотвращению или смягчению отказов, обусловленных конструкторско-технологическими факторами.

**Обоснование работоспособности и надежности при выполнении проектно-конструкторских работ.** Исходя из условий (1)–(12), приведенной на рисунке схемы, данных таблицы следует, что для обоснования работоспособности и надежности конструкций изделий конструкторы используют следующие приемы:

- проводят расчеты на прочность с учетом действующих нагрузок и предельных состояний, при этом для достижения условий прочности применяют коэффициенты безопасности, увеличивающие значения действующих нагрузок, на основе которых выбирают конструкционные материалы и геометрические размеры поперечных сечений наиболее нагруженных элементов;

- обеспечивают условия функционирования по преобразованию энергии согласно физическим законам и закономерностям, а результат функционирования оценивают физическими (за счет запасов работоспособности) или статистическими (используя компоненты и элементы с заданными показателями надежности) методами расчета;

- обеспечивают условия надежности функционирования конструкторско-технологическими методами:

- с учетом способов достижения избыточности конструкции (структурной, функциональной, нагрузочной и в соответствии с Р 50-54-82–88);

- на основе процедур получения гарантированных результатов (использования минимаксных критериев, факторов инженерной психологии, режимов проведения особенно ответственных операций и т. д.);

- моделируя (эмулируя) спорадические события и воздействия антропогенного, техногенного или природного характера;

- используя другие конструкторские и организационно-технические приемы, позволяющие обеспечить сохранение выходных параметров в допустимой области своих значений.

**Общность и различия механизмов и бортового оборудования космического аппарата с позиции применения КТАН.** Процедуры КТАН позволяют представить конструкцию любого изделия, независимо от физического принципа действия, в виде наборов [1–3]:

- необходимых и достаточных параметров, обеспечивающих работоспособность и надежность изделия, — параметрической модели;

- математических моделей и методов верификации их параметров — инженерной модели;

- необходимых и достаточных требований к изготовлению и эксплуатации изделий — информационной модели.

Различия указанных моделей для конструкций с разными принципами действия будут выражаться в конкретных значениях и количестве параметров, типах математических моделей и формулировках требований, характерных для применяемых при проектно-конструкторских разработках физических законов и закономерностей. В частности, в качестве математических могут использоваться физические, статистические, логико-вероятностные или смешанные модели. Все они служат одной цели — верификации параметров, обеспечивающих требуемые работоспособность и надежность, и созданию на этой основе информационной модели изделия — набора требований к изготовлению и эксплуатации, которая (согласно определению термина «изделие» по ГОСТ 2.101–2016) служит основой для его изготовления.

**Заключение.** Результаты применения КТАН показывают, что не существует различных по форме методов обоснования работоспособности и надежности изделий различного назначения, существует

лишь разнообразие содержания инженерных задач, обеспечивающих выполнение их служебного назначения. При этом верификация решения инженерных задач может быть выполнена с помощью формализованных процедур конструкторско-технологического анализа надежности.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Похабов Ю.П. *Конструкторско-технологический анализ надежности*. Красноярск, СФУ, 2022. URL: <https://elib.sfu-kras.ru/handle/2311/145578?show=full&ysclid=la7xc81kmz225201519> (дата обращения 20.02.2023).
- [2] Похабов Ю.П. *Теория и практика обеспечения надежности механических устройств одноразового срабатывания*. Красноярск, СФУ, 2018, 338 с.
- [3] Похабов Ю.П. Проектирование высокоответственных систем с учетом надежности на примере поворотной штанги. *Журнал СФУ. Техника и технологии*, 2019, т. 12, № 7, с. 861–883.
- [4] Тимашев С.А., Похабов Ю.П. *Проблемы комплексного анализа и оценки индивидуальной конструкционной надежности космических аппаратов (на примере поворотных конструкций)*. Екатеринбург, АМБ, 2018, 38 с.
- [5] Timashev S.A. Methodology of assessing individual reliability of unique structures. *Russian Journal of Construction Science and Technology*, 2019, vol. 5, no. 1, pp. 5–19.
- [6] Похабов Ю.П., Ушаков И.А. О безаварийности функционирования уникальных высокоответственных систем. *Методы менеджмента качества*, 2014, № 11, с. 50–56.
- [7] Круглов Г.Е. *Аналитическое проектирование механических систем*. Самара, СГАУ, 2001, 132 с.
- [8] Зимин В.Н., Борзых С.В. *Механика трансформируемых крупногабаритных космических конструкций. Ч. 1: Солнечные батареи космических аппаратов*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012, 67 с.
- [9] Горовцов В.В., Жиряков А.В., Теплов П.П. и др. Исследование динамики решения и задачи проектирования трансформируемых конструкций посадочного модуля КА «Экзомарс». *Вестник НПО имени С.А. Лавочкина*, 2016, № 4, с. 75–80.
- [10] Веников Г.В. *Проектирование и надежность*. Москва, Знание, 1971, 96 с.
- [11] Золотов А.А., Похабов Ю.П., Гусев Е.В. Обеспечение проектной надежности раскрывающихся конструкций космических аппаратов. *Общероссийский научно-технический журнал «Полет»*, 2018, № 7, с. 36–45.
- [12] Похабов Ю.П., Шендалёв Д.О., Колобов А.Ю. и др. К вопросу установления коэффициентов безопасности и запасов прочности при заданной вероятности неразрушения силовых конструкций. *Сибирский аэрокосмический журнал*, 2021, т. 22, № 1, с. 166–176.
- [13] Кузнецов А.А. *Надежность конструкции баллистических ракет*. Москва, Машиностроение, 1978, 256 с.
- [14] Кузнецов А.А., Золотов А.А., Комягин В.А. и др. *Надежность механических частей конструкции летательных аппаратов*. Москва, Машиностроение, 1979, 144 с.
- [15] Тестоедов Н.А., Михнёв М.М., Михеев А.Е. и др. *Технология производства космических аппаратов*. Красноярск, СибГАУ, 2009, 349 с.

Статья поступила в редакцию 23.07.2023

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Похабов Ю.П. Некоторые выводы по результатам применения конструкторско-технологического анализа надежности для изделий ракетно-космического назначения. Часть 2. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2023, вып. 9. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2023-9-2304>

**Похабов Юрий Павлович** — канд. техн. наук, главный специалист, АО «НПО ПМ МКБ». e-mail: [pokhabov\\_yury@mail.ru](mailto:pokhabov_yury@mail.ru)

## Certain conclusions on results of introducing the reliability design and technological analysis in rocket and space production. Part 2

© Yu.P. Pokhabov

JSC “NPO PM MKB”, Zheleznogorsk, Krasnoyarsk Territory, 662972, Russia

*The paper generalizes results of introducing procedures of reliability design and technological analysis (RDTA) in the one-time actuation mechanisms of the spacecraft rotary structures (hereinafter referred to as the mechanisms). It provides principles of the mechanisms design and examples of establishing the design documentation requirements in their design process. The differences between processes of the mechanism design and construction are presented, and examples of design and technological factors that could lead to potential failures of such mechanisms are given. Principles of substantiating the spacecraft onboard equipment performance and reliability are considered. Commonality and differences in substantiating performance and reliability of mechanisms and of other onboard equipment of spacecraft are provided. As a result of the RDTA introduction, it was revealed that methods were missing in substantiating performance and reliability of the products for various purposes that were different in form. Only the content of engineering tasks that ensured fulfillment of their service purpose was varying. Moreover, solutions to such problems could be verified using the formalized procedures in reliability design and technological analysis.*

**Keywords:** reliability design and technological analysis (RDTA), rocket and space products, reliability, failure, design errors

### REFERENCES

- [1] Pokhabov Yu.P. *Konstruktorско-tekhnologicheskiiy analiz nadezhnosti* [Reliability design and technological analysis]. Krasnoyarsk, SFU Publ., 2022. Available at: <https://elib.sfu-kras.ru/handle/2311/145578?show=full&ysclid=la7xc81kmz225201519> (accessed February 20, 2023).
- [2] Pokhabov Yu.P. *Teoriya i praktika obespecheniya nadyezhnosti mekhanicheskikh ustroystv odnorazovogo srbatyvaniya* [Theory and practice of ensuring the need for mechanical devices of one-time operation]. Krasnoyarsk, SFU Publ., 2018, 338 p.
- [3] Pokhabov Yu.P. *Proektirovanie vysokootvetstvennykh sistem s uchetom nadezhnosti na primere povorotnoy shtangi* [Design for reliability highly responsible systems on the example of a moving rod]. *Zhurnal SFU. Tekhnika tekhnologii — Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*, 2019, vol. 12, no. 7, pp. 861–883.
- [4] Timashev S.A., Pokhabov Yu.P. *Problemy kompleksnogo analiza i otsenki individualnoy konstruktsionnoy nadezhnosti kosmicheskikh apparatov (na primere povorotnykh konstruktsiy)* [Integrated analysis and assessment problems of individual structural reliability of spacecraft (case of deployable structures)]. Ekaterinburg, AMB Publ., 2018, 38 p.
- [5] Timashev S.A. Methodology of assessing individual reliability of unique structures. *Russian Journal of Construction Science and Technology*, 2019, vol. 5, no. 1, pp. 5–19.
- [6] Pokhabov Yu.P., Ushakov I.A. *O bezavariynosti funktsionirovaniya unikalnykh vysokootvetstvennykh sistem* [On trouble-free functioning of the unique highly

- responsible systems]. *Metody menedzhmenta kachestva — Quality management methods*, 2014, no. 11, pp. 50–56.
- [7] Kruglov G.E. *Analiticheskoe proektirovanie mekhanicheskikh sistem* [Analytical design of mechanical systems]. Samara, SGAU Publ., 2001, 132 p.
- [8] Zimin V.N., Borzykh S.V. *Mekhanika transformiruemykh krupnogabaritnykh kosmicheskikh konstruksiy. Ch. 1: Solnechnye batarei kosmicheskikh apparatov* [Mechanics of transformable large-sized space structures. Part 1: Spacecraft solar batteries]. Moscow, BMSTU Publ., 2012, 67 p.
- [9] Gorovtsov V.V., Zhiryakov A.V., Telepnev P.P., et al. Issledovanie dinamiki resheniya i zadachi proektirovaniya transformiruemykh konstruksiy posadochnogo modulia KA “Ekzomars” [Dynamic analysis and design approach to transformable structures of the “Exomars” landing module]. *Vestnik NPO imeni S.A. Lavochkina — Bulletin of Lavochkin Association*, 2016, no. 4, pp. 75–80.
- [10] Venikov G.V. *Proektirovanie i nadezhnost* [Design and reliability]. Moscow, Znanie Publ., 1971, 96 p.
- [11] Zolotov A.A., Pokhabov Yu.P., Gusev E.V. Obespechenie proektnoy nadezhnosti raskryvayuschikhsya konstruksiy kosmicheskikh apparatov [Ensuring design reliability of the deployable spacecraft structures properties]. *Obscherossiyskiy nauchno-tekhnicheskii zhurnal “Polet” — All-Russian Scientific-Technical Journal “Polyot” (“Flight”)*, 2018, no. 7, pp. 36–45.
- [12] Pokhabov Yu.P., Shendalev D.O., Kolobov A.Yu., et al. K voprosu ustanovleniya koeffitsientov bezopasnosti i zapasov prochnosti pri zadannoy veroyatnosti nerazrusheniya silovykh konstruksiy [To the question of establishing safety coefficient and assurance coefficient at a given probability of non-destruction of load-bearing structures]. *Sibirskiy aerokosmicheskoy zhurnal — The Siberian Aerospace Journal*, 2021, vol. 22, no. 1, pp. 166–176.
- [13] Kuznetsov A.A. *Nadezhnost konstruksii ballisticheskikh raket* [Reliability of the ballistic missile design]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1978, 256 p.
- [14] Kuznetsov A.A., Zolotov A.A., Komyagin V.A., et al. *Nadezhnost mekhanicheskikh chastey konstruksii letatelnykh apparatov* [Reliability of mechanical parts of the aircraft structures]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1979, 144 p.
- [15] Testoedov N.A., Mikhnev M.M., Mikheev A.E., et al. *Tekhnologiya proizvodstva kosmicheskikh apparatov* [Spacecraft production technology]. Krasnoyarsk, SibGAU Publ., 2009, 349 p.

**Pokhabov Yu.P.**, Cand. Sc. (Eng.), Chief Specialist, JSC “NPO PM MKB”.  
e-mail: pokhabov\_yury@mail.ru