

О надежности высокоответственных невосстанавливаемых изделий космического назначения с малой наработкой на примере механических устройств одноразового срабатывания

Юрий П. Похабов, Акционерное общество «НПО ПМ – Малое Конструкторское Бюро» (АО «НПО ПМ МКБ»), Железногорск, Красноярский край, Российская Федерация
pokhabov_yury@mail.ru



Юрий П. Похабов

Резюме. Цель. Рассмотреть вопросы обеспечения надежности высокоответственных невосстанавливаемых изделий космического назначения с малой наработкой, отказы которых определяются главным образом конструкторскими и технологическими ошибками и несоблюдением условий бездефектного производства при единичном или мелкосерийном изготовлении, а также определить методологический подход к обеспечению требуемой их безотказности. **Методы.** Проведен анализ вариантов повышения надежности изделий с малой наработкой на примере механических устройств одноразового срабатывания при использовании статистических подходов современной теории надежности, специальных методов обеспечения надежности механических подвижных узлов, методологии FMEA-анализа, концепции Stage-Gate и проведении наземной экспериментальной отработки на единичных отработочных макетах для каждого вида воздействий. **Результаты.** Сделан вывод о необходимости проведения дополнительных процедур по прогнозированию, смягчению и (или) исключению возможных отказов в процессе конструирования на основе точно таких же подходов, которые и приводят к отказам – конструкторских и технологических. Конструкторско-технологические подходы к надежности основаны на раннем выявлении возможных причин отказов, что требует выполнения квалифицированного и системного анализа по определению функциональности, работоспособности и надежности изделия с учетом критичных выходных параметров и вероятностных показателей, влияющих на выполнение требуемых функций с допустимой вероятностью отказов. Решение такой задачи осуществляют с использованием обобщенной параметрической модели функционирования и методики проведения конструкторско-технологического анализа надежности. **Заключение.** Для высокоответственных невосстанавливаемых изделий космического назначения с малой наработкой требования безотказности разумно рассматривать главным образом с позиций финансово-экономических, безопасностных и имиджевых рисков утраты космических аппаратов. С точки зрения инженера-конструктора число девяток после запятой (с учетом округления до меньшего числа девяток для повышения достоверности) следует воспринимать как индикатор для применения соответствующих подходов к обеспечению требуемой безотказности при разработке изделия. При двух заданных девятках после запятой вполне приемлемо использовать методики аналитической и экспериментальной верификации, принятые в ракетно-космической отрасли, – выполнение расчетов надежности статистическими методами современной теории надежности и параметров работоспособности, использование методологии FMEA-анализа и концепции Stage-Gate, проведение наземной экспериментальной отработки на единичных отработочных макетах для каждого вида воздействий. При увеличении числа требуемых девяток целесообразно дополнительно применять методики раннего предупреждения отказов, одной из которых является конструкторско-технологический анализ надежности, дающий возможность конструктору принимать обоснованные технические решения на основе инженерных дисциплин и конструкторско-технологических способов обеспечения качества и надежности. Выбор одной из двух указанных стратегий обеспечения надежности определяется исключительно осознанием и пониманием разработчиком потенциальных опасностей, что дает возможность управлять рисками возникновения возможных редких отказов либо обоснованно отказаться от такой возможности.

Ключевые слова: расчет надежности, концепция Stage-Gate, FMEA-анализ, подвижные механические узлы, устройства одноразового срабатывания, космический аппарат, конструкторско-технологический анализ надежности (КТАН).

Для цитирования: Похабов Ю.П. О надежности высокоответственных невосстанавливаемых изделий космического назначения с малой наработкой на примере механических устройств одноразового срабатывания // Надежность. 2021. № 3. С. 3-12. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2021-21-3-3-12>

Поступила 26.05.2021 г. / После доработки 15.07.2021 г. / К печати 17.09.2021 г.

Введение

Конфигурация современных космических аппаратов (КА) в процессе выведения претерпевает четыре изменения кинематических состояний [1]:

1) эксплуатация в составе ракеты-носителя с компактными сложными конструкциями в стартовом положении (спутник консольно установлен на ракете, а его складные конструкции уложены в заданный объем и закреплены на корпусе);

2) отделение от средств выведения и орбитальный полет со складными конструкциями в стартовом положении (спутник отсоединен и отведен от ракеты на безопасное расстояние, но его конструкции остаются уложенными и закрепленными на корпусе до завершения фазы подготовки к раскрытию);

3) раскрытие конструкций при помощи механических устройств из стартового положения в рабочее (механические связи с корпусом сняты и элементы конструкции совершают предписанные движения, занимая заданное консольное положение относительно корпуса);

4) работа бортовых систем и оборудования спутника по целевому назначению в течение заданного срока активного существования с раскрытыми конструкциями в рабочем положении.

Указанная последовательность изменения состояний спутника определяется условиями и ограничениями по его доставке на околоземную орбиту многоступенчатыми ракетами [2]. Только после того, как все механизмы сработают: отделить и развернуть складные конструкции в заданную конфигурацию, КА получает возможность нормального функционирования на орбите. В противном случае все усилия по созданию и запуску ракеты-носителя с КА теряют свою эффективность, а иногда и смысл.

Механизмы космического назначения являются невосстанавливаемыми системами, поэтому цена отказов при отделении от ракеты-носителя и раскрытии механических устройств – это частичная или полная потеря функциональности КА еще до начала выполнения задач, ради которых он создается и запускается [3]. Как показывает история космических запусков, отказы механических устройств одноразового срабатывания являются не такими редкими событиями; так, доля отказов при развертывании спутника может составлять до 10,05%, а при отделении от ракет-носителей – 12,8% [4]. При этом практически каждый раз спутнику наносится ущерб различной степени тяжести (за исключением случаев самораскрытия после возникновения отказов из-за тепловых эффектов, например, при развертывании антенн на Кику 8). Так, три месяца спиновых маневров после нераскрытия антенны С-диапазона на спутника Anik E2 привели к перерасходу топлива, соответствующему году штатной работы на орбите. Неполное раскрытие крыльев солнечных батарей на Telstar 14, Telstar 14R и Intelsat 19 вызвало дефицит электроэнергии, что послужило причиной принудительного отключения части приемопередающих устройств полезной нагрузки

(например, на Telstar 14R были отключены 17 транспондеров из 41). Из-за нераскрытия солнечных батарей погибли спутники Sinosat 2 стоимостью \$190 млн и Chinasat 18 – \$250 млн, так и не начав свою работу по целевому назначению. Ежегодно в мире происходит минимум 1–2 отказа механических устройств одноразового срабатывания при отделении и раскрытии на орбитальном участке полета КА, а средняя вероятность отказов доходит до 0,004 в год [5]. В то же время, безотказность механизмов раскрытия и фиксации согласно ОСТ 92-4339 должна быть не ниже 0,999 с доверительной вероятностью 90%, а точечное значение вероятности срабатывания механических устройств для современных аппаратов длительного функционирования задается не менее 0,9995 [6–8].

Выводы простые и неутешительные. За более чем 60-летнюю историю космонавтики так и не появилось научно-обоснованных методик разработки и создания механизмов одноразового срабатывания с требуемой безотказностью. Причем даже продолжительное (за последние 20–30 лет) отсутствие отказов у отдельных разработчиков механизмов отделения и раскрытия не может рассматриваться как бесспорное свидетельство безошибочности методов обеспечения надежности из-за малых выборок статистических данных. В частности, при требуемой безотказности механических устройств выше 0,9995, безаварийный запуск до 10 аппаратов в год (максимум – около 300 шт. за 30 лет), что соответствует плановому объему производства одного из крупнейших отечественных разработчиков, сам по себе не дает никаких гарантий достижения безотказности на уровне 0,9995 даже с доверительной вероятностью 15% [5, 9, 10]. Это при том, что на потерю работоспособности механизмов одноразового срабатывания практически не оказывают влияния такие причины неопределенности, как старение и деградация материалов и соединений в результате длительного воздействия факторов космического пространства. В большинстве случаев наработка до отказа таких изделий является минимальной – это время выведения на орбиту и раскрытия из стартового положения, которое в сумме не превышает десятков минут и повторного срабатывания на орбите не предполагается [5, 8]. Соответственно, отказы механических устройств определяются главным образом конструкторскими и технологическими ошибками и несоблюдением условий бездефектного производства при единичном и (или) мелкосерийном изготовлении [5, 11–14]. Предупреждение¹ таких отказов зависит главным образом от степени обоснованности и установления необходимых и достаточных требований в конструкторской документации для изготовления и

¹ Предупреждение отказов: Реализация в процессе создания (модернизации), производства и эксплуатации изделий совокупности организационно-технических мероприятий, обеспечивающих профилактику, выявление, исследование и устранение причин отказов изделий [ОСТ 134-1012–97, раздел 4].

обеспечения соответствующего контроля значений ключевых характеристик критичных элементов на всех стадиях жизненного цикла [15].

В свете указанных обстоятельств рассмотрим варианты повышения надежности высокоответственных невосстанавливаемых изделий с малой наработкой и один из методологических подходов к обеспечению требуемой безотказности функционирования механических устройств КА одноразового срабатывания.

Возможности современной теории надежности

Во-первых, буквально все нормативные документы и научно-методическая литература требуют проводить расчеты надежности на базе известной из опыта ненадежности – апостериорных знаний о возможных отказах [16, 17]. Считается, что для расчета надежности необходимо исходить из презумпции отказов, которые якобы не могут не произойти по определению, поэтому для проведения расчетов надежности следует знать статистическую вероятность отказов изделия в целом или, по крайней мере, фактическую ненадежность его компонентов и элементов в заданных режимах и условиях применения [18]. Если известных показателей надежности (а фактически – ненадежности) не существует, то по канонам современной теории надежности их следует наработать статистическими методами [19–21]. По-другому не позволяют требования стандартов, например, ГОСТ 27.002¹, ГОСТ 27.301, ГОСТ РО 1410-001 и т. п.

Во-вторых, применительно к механическим устройствам одноразового срабатывания КА для обеспечения безотказности, например, 0,9995 необходимо провести не менее 9995 независимых испытаний (опытов) в однородных условиях. Другими словами, согласно нормативным документам необходимо раскрыть на орбите (не при наземных испытаниях, иначе не обеспечится условие однородности выборки) не менее 9995 механических устройств (не испытаний одного устройства 9995 раз, иначе нарушается условие независимости испытаний), и все это только для того, чтобы подтвердить, что однократное штатное раскрытие произойдет с требуемой надежностью. Допустим, что безотказность 0,9995 достаточно обеспечить с доверительной вероятностью 0,9, но и тогда число независимых испытаний в однородных условиях не должно быть меньше 4605 [22] (см. пример в ГОСТ Р 27.003 для определения минимального объема статистических испытаний при заключении контрактов в части надежности). Если воспользоваться методом расчета надежности по известным показателям надежности компонентов и элементов, то статистических испытаний в условиях космического пространства потребуется значительно больше, чем для самих механических устройств, поскольку те состоят из десятков и

сотен составных частей в виде простейших механизмов и устройств, число требований к надежности которых растет экспоненциально числу функциональных элементов, влияющих на общую надежность системы [23]. Очевидно, что получить достоверные данные для расчета надежности высокоответственных механических устройств статистическими методами современной теории надежности практически невозможно по финансово-экономическим соображениям (в 2018 г. запуск 1 кг груза стоил \$20–30 тыс., на 2020 г. – \$15–17 тыс. [24]).

В-третьих, у человечества просто физически нет объектов-аналогов, необходимых для расчета надежности механических устройств с безотказностью близкой к 0,9999. Общее число успешно запущенных спутников в мире за период 1958–2010 гг. составляет 6264 [25]. За период 2011–2016 гг. добавилось еще 1153 КА [5]. Даже если закрыть глаза на условие однородности выборки, то все равно невозможно полагаться на достоверность статистических данных для расчетов безотказности раскрытия, например, солнечных батарей на уровне 0,9995 (которые есть практически на каждом спутнике).

В-четвертых, в ракетно-космической отрасли принято считать, что изделия, получившие летную квалификацию, являются надежными [9]. Однако высокие требования к показателям надежности при малом объеме выборки не соотносятся со статистическими подходами современной теории надежности. Отказ, который допустим, например, на 10000 испытаний (опытов), может произойти в момент проведения любого по счету испытания, и если, положим, 100 испытаний подряд прошли успешно, то не факт, что 101-е испытание не завершится отказом. В этом случае допустимо говорить о том, что 100 раз подряд изделие подтвердило свою работоспособность (но, ни в коем случае, не давать заключений, касающихся надежности). Поэтому без научно-методического обоснования возможности достижения требуемой безотказности (т. е. без проведения дополнительных анализов и/или моделирования, подтверждающих выполнение требуемых функций без отказов) делать какие-либо выводы о надежности высокоответственных изделий при малой наработке с инженерной точки зрения попросту опрометчиво.

Таким образом, использование только лишь статистических подходов современной теории надежности недопустимо для обеспечения высоконадежного функционирования механических систем одноразового срабатывания. Очевидно, что в данном случае необходимо выявлять прежде всего причины, а не следствия (статистику) отказов. Соответственно, требуются методики проведения инженерного анализа и расчета надежности, основанные на физических явлениях, которые описываются физическими теориями, на базе чего должны быть построены математические модели потери (или сохранения) работоспособности объекта при изменении его внутреннего состояния в заданных режимах и условиях применения [26].

¹ См. термины, касающиеся методов определения надежности [статьи 3.7.9–3.7.11].

Специальные методы обеспечения надежности механических устройств одноразового срабатывания

Методика расчета надежности механических частей подвижных конструкций КА впервые опубликована в 1978–1979 гг. [27, 28]. Дополнительно к расчету прочностной надежности был предложен расчет функциональной надежности, основанный на определении вероятности превышения движущих моментов (сил) приводов (актуаторов) над резистентными моментами (силами) на пути движения исполнительных частей механизма, а также расчет суммарной надежности механизмов (прочностной и функциональной) на основе модели фиктивных элементов (агрегатов) [28]. В дальнейшем расчет функциональной надежности механизмов стали проводить с учетом запасов движущих моментов (сил) [29–33] по аналогии с детерминированными расчетами на прочность по установленным коэффициентам безопасности и запасам прочности [34]. За рубежом выполнение требований по запасам движущих моментов (сил) является неотъемлемой частью всех стандартов проектирования подвижных механических узлов («Moving mechanical assemblies», MMA) ракетно-космического назначения. Нормативные значения запасов движущих моментов (сил) с 1975 г. установлены в военном стандарте MIL-A-83577, а позднее – гражданских стандартах AIAA S-114–2005, NASA-STD-5017A и ECSS-E-ST-33-01C. В нашей стране не существует официальных стандартов (ГОСТ, ГОСТ Р, ОСТ, СТП, СТО) по проектированию механических устройств с учетом запасов движущих моментов (сил), но сложившаяся годами практика применения такова, что выбор приводов раскрытия производят исходя из условий обеспечения запасов движущих моментов (сил) не менее 100 % (соотношение 2:1) к худшему значению резистивных моментов (сил) в любой точке траектории движения механизма из расчета нулевой кинетической энергии [32, 33]. Принято считать, что при соблюдении установленных коэффициентов безотказности, запасов прочности и движущих моментов (сил) и условий успешного подтверждения критериев экспериментальной отработки (согласно определению термина «экспериментальная отработка» по ГОСТ Р 58630), заданная безотказность раскрытия и фиксации механических устройств обеспечивается по умолчанию [29–31].

Тем не менее, исследования реальных причин отказов показывают, что в подавляющем большинстве случаев они имеют редкий характер, определяемый неблагоприятным сочетанием допусков на изготовление, неучтенными факторами технологической наследственности, режимов применения и внешних воздействий [5, 15]. Такие отказы могут быть вызваны, например, внезапным исчезновением зазоров в кинематических парах (Кику 8, Союз ТМА-17М), неблагоприятным сочетанием производственных факторов (Intelsat 19), технологическими дефектами (Канопус-СТ, Прогресс М-19М), попаданием

в механизм раскрытия посторонних предметов (Skylab, Telstar 14, Telstar 14R), отказами приводов раскрытия (EchoStar 4), несанкционированным раскрытием (Ресурс-П № 3), конструкторско-технологическими ошибками (Маяк), холодной сваркой (Galileo) и т. п. Практика показывает, что расчеты надежности статистическими методами современной теории надежности и параметров работоспособности (из рекомендуемого перечня номенклатуры расчетов по ОСТ 92-0290), а также успешное проведение наземной экспериментальной отработки на единичных отработочных макетах для каждого вида воздействий не способны предотвратить риски возникновения редких отказов [16, 35]. Современные методы экспериментальной отработки не предназначены для выявления и эмулирования расчетных случаев, которые соответствуют критичным сочетаниям предельных состояний изделия, факторов режимов и внешних воздействий [5]. Причем для малых вероятностей отказов (не более 0,01) суммарная ошибка при оценке надежности по результатам экспериментальной отработки может достигать не менее порядка величины значащей цифры, при том, что для инженерных расчетов считается приемлемой ошибка не более $5 \div 10\%$ [5, 36–38].

Концепция Stage-Gate

В соответствии с концепцией Stage-Gate, реализация любого проекта¹ определяется последовательным выполнением кросс-функциональных действий и мероприятий (stage), отделенных друг от друга точкам принятия решений (gate) для перехода к последующему этапу плана проведения работ (в системе stage-gate) [39].

Фактически идет речь о процессных стандартах управления проектами, которые, в отличие от принятых в отечественной практике стандартов требований (ГОСТ, ГОСТ Р, ОСТ, СТП, СТО), устанавливают порядок и процедуры принятия надлежащих решений и осуществления необходимых действий. В частности, по процессному принципу разработаны стандарты ЕКА, предназначенные для управления, инженерных разработок и гарантии качества в космических проектах, например, для космических механизмов – ECSS-E-ST-33-01C.

При очевидной пользе процессных стандартов, основанных на концепции Stage-Gate, – доступности использования инженерами «средней» квалификации для достижения требуемого качества и надежности, когда все их решения и действия регламентированы набором заранее установленных (причем, не ими) процедур, слепое исполнение формализованных предписаний способно привести к утрате физического смысла решений и целеполагания действий. К примеру, при разработке механизма какого-либо конкретного принципа действия – процессные стандарты безусловно полезны, но при изменении физических принципов работы механизма

¹ Проект: Временное предприятие, направленное на создание уникального продукта, услуги или результата [Руководство РМВОК, глоссарий].

необходимо своевременно скомпенсировать изъяны используемых процедур в стандартах. Этого можно достичь за счет применения инженерных методик на основе строго определенных алгоритмизированных процедур либо эвристик инженеров. В первом случае – это быстрый путь подстройки существующей инженерной методики, во втором – относительно долгий путь проб и ошибок, связанный с накоплением и обобщением закономерностей поведения новых изделий для обеспечения требуемых свойств [40].

Методология FMEA-анализа

Цель разработки метода анализа видов и последствий отказов (FMEA, российский аналог – АВПО) заключается в обнаружении и устранении технических проблем в сложных системах путем изучения каждого вида отказа любого критичного компонента. FMEA-анализ и его разновидности: DFMEA, PFMEA и MFMEA основаны на мозговом штурме или экспертном оценивании видов и последствий отказов критичных элементов, к которым в случае необходимости добавляют анализ критичности отказов для оценки безопасности (FMECA, российский аналог – АВПКО), или анализ интенсивности отказов на основе статистических данных для оценки надежности (FMEDA).

Методика проведения FME[C,D]A-анализа предусматривает следующие шаги:

- определение структуры анализируемого объекта (структурный анализ);
- определение возможных критичных сценариев событий (функциональный анализ);
- непосредственное выполнение процедур анализов для определения видов, последствий и причин отказов с оценкой риска для проведения предупреждающих или корректирующих действий (FMEA), вычисления на основе FMEA-анализа показателей безопасности – числа приоритетности риска или критичности отказа (FMECA), нахождения по результатам FME[C]A-анализа частоты (интенсивности) отказов (FMEDA) для расчета надежности;
- оценка и документирование результатов анализов (FMEA, FMECA или FMEDA).

FME[C,D]A-анализы выполняет межфункциональная команда из специалистов различного профиля (например, конструктор, технолог, сборщик, испытатель, контролер и т. п.) численностью до 7–8 человек, имеющая практический опыт и высокий профессиональный уровень [41]. Принципы формирования и организации работ FMEA-команд определены стандартами и руководящими документами, например, ГОСТ Р 51814.2, СТБ 1506, РД 03-418-01 и др.

FMEA-анализ и его расширенные модификации (FMECA, FMEDA) выполняют эксперты, работающие по формализованным алгоритмам и процедурам для получения субъективных полуколичественных оценок (на основе рейтингов значимости последствий, вероятности

возникновения и обнаружения) потенциальных отказов (неисправностей). При этом эксперты обычно имеют разный профессиональный взгляд на анализируемый объект, который не всегда соответствует пониманию того, как именно и в каких условиях этот объект работает [42]. Эксперты не знают (причем стандарты FMEA не обязывают их это знать) конструкторского замысла, направленного на решение конкретных технических задач, поэтому оценку последствий дефектов оценивают на основании внешних признаков (показателей), заметных потребителю, и понятных им с точки зрения личных профессиональных качеств (знаний, квалификации и опыта).

Между тем, замысел конструктора самым тесным образом связан с установлением и обоснованием выходных параметров критичных элементов объекта в допустимой области изменения их значений [17, 36, 37]. Причем, если стандарты FMEA-анализа (например, ГОСТ Р 51814.2) еще предписывают определять виды потенциальных отказов на языке физических и технических терминов (трещина, деформация, заедание, разрушение, утечка и т. д.), то последствия отказов рекомендуется описывать в терминах потребителя (то, что он может заметить или испытать), например, шум, неправильная работа, неустойчивость, прерывистая работа и проч. [43]. С выходными параметрами и их допустимыми диапазонами, которые так или иначе устанавливает конструктор, результаты FMEA-анализа никак не связаны либо соотносятся опосредованно.

Подход к обеспечению надежности механических устройств одноразового срабатывания

В условиях, когда методы современной теории надежности не позволяют с допустимой точностью решать задачи надежности высокоответственных изделий при малой наработке из-за неприменимости статистических подходов, а специальные и вспомогательные методы не предназначены для выявления причин и оценки рисков возникновения редких отказов, остается только прогнозировать, смягчать или исключать возможные отказы в процессе конструирования на основе точно таких же подходов, которые и приводят к отказам – конструкторских и технологических.

Если исходить из принципов рационального конструирования, то конструкцию¹ и любой из ее конструктивных элементов необходимо рассматривать с позиций выполнения ими строго определенных функций, которые изначально задуманы и реализованы

¹ Конструкция: Устройство, взаимное расположение частей какого-либо предмета, машины, прибора, определяющее его назначением и предусматривающее способ соединения, взаимодействия частей, а также материал, из которого отдельные части (элементы) должны быть изготовлены [ГОСТ Р 57945–2017, статья 2.66].

конструктором посредством принятия и исполнения конкретных решений (проектных, конструкторских, конструкторско-технологических, технологических)¹. Такие решения основаны на физическом понимании мира и использовании конструкторско-технологических способов их реализации в технических объектах. В этом случае следует обосновывать каждое решение конструктора, которое потенциально способно привести к отказу, при этом любой довод должен находиться в логике рассуждений конструктора – понятной и доступной ему для обеспечения функционирования изделия без отказов.

Для подтверждения таких решений разумно использовать приемы параметрического моделирования изделий на основе имеющихся схем (конструктивно-компоновочных, конструктивно-силовых и проч.), эскизов, чертежей, 3D-моделей. В этом случае любые графические, текст-графические или цифровые модели конструкции должны быть представлены в виде параметрической модели, при изменении параметров которой достигается выполнение изделием всех требуемых функций.

Исходя из принципов физичности (закономерностей причинно-следственных связей)² и физической необходимости (непротиворечия законам природы)³ несложно представить выполнение изделием требуемых функций на основе параметрической модели, описывающей его функциональность, работоспособность и надежность [17, 36, 37, 44]. Логическая последовательность рассуждений здесь такова. Если конструкцию представить как набор выходных параметров, которые характеризуют выполнение требуемых функций (т. е. функциональность), значение каждого параметра конструкции определить исходя из сочетания режимов и условий применения (т. е. работоспособность), а изменение значений параметров конструкции во времени ограничить в допустимом диапазоне (т. е. надежность), то можно получить обобщенную параметрическую модель функционирования изделия, в которой критерии выполнения требуемых функций (выходные параметры и допустимые диапазоны изменения их значений) взаимосвязаны, взаимообусловлены и подчинены целям достижения заданной работоспособности и надежности [44]. С недавних пор такой подход укладывается в логику требований стандартов серии «Системы и комплексы космические», разработанных АО «ЦНИИмаш» в 2019–2020 гг.

¹ Согласно определениям соответствующих терминов, связанных со словом «решение» по ГОСТ Р 57945.

² Физичности принцип: Принцип, согласно которому всякой системе (независимо от ее природы) присущи законы (закономерности), возможно, уникальные, определяющие внутренние причинно-следственные связи ее существования и функционирования.

³ Физическая необходимость: Фактическая обусловленность явления определенным обстоятельством действительности и однозначно предсказуемое в рамках знания о ней (противопоставляемая случайности).

1. С введением государственного стандарта ГОСТ Р 58629 одна из задач анализа видов, последствий и критичности отказов (АВПКО) изделий и процессов космического назначения направлена на определение ключевых конструктивных (функциональных и физических) характеристик критичных элементов и их контролепригодности. Правда в стандарте не установлен метод решения задачи по выявлению таких ключевых характеристик (хотя, исходя из общей концепции проведения FMEA-анализа, можно предположить, что они определяются, например, методом экспертных оценок). Кроме того, не совсем понятно, как поступать в случае, если выполнение требуемых функций невозможно выразить физическими величинами, но можно характеризовать качественными признаками изделия, которые описываются вероятностями (как степенью уверенности в том, что при установленных условиях, некоторое событие произойдет). Тем не менее, в целом требования стандарта ГОСТ Р 58629 по выявлению ключевых характеристик критичных элементов соответствуют концепции установления функциональности в обобщенной параметрической модели функционирования изделия [44].

2. Анализ худшего случая по ГОСТ Р 58626 предоставляет возможность определения и перечень формализованных процедур анализа, включающих в себя количественную оценку допусков изменения значений выходных параметров объекта анализа в зависимости от возможных значений его внутренних и входных параметров. Данная процедура есть не что иное, как определение работоспособности изделия при худших сочетаниях режимов и условий применения в обобщенной параметрической модели функционирования изделия [44]. Однако согласно ГОСТ Р 58626, такой анализ проводится на основании результатов АВПКО (АВПО), выполненного в соответствии с требованиями ГОСТ Р 58629, т. е. методом экспертных оценок, исходя из мнения экспертов (специалистов) для последующего принятия (или выбора) решений, что не является достаточным условием для установления полного перечня худших случаев. Кроме того, в силу неразвитости терминологии отдельных понятий, например, «режим» и «эмерджентность» [44, 45], подход к анализу худшего случая по ГОСТ Р 58626 сохраняет неопределенности по вычислению максимальных и минимальных значений допустимых отклонений (наихудшего случая) выходных параметров.

3. Согласно разъяснениям, приведенным в справочном приложении к ГОСТ 27.002-89, не принято делать различий между показателем вероятности безотказной работы по условиям прочности на основании статистических данных и вероятностью того, что в пределах заданного отрезка времени изменения значений параметров прочности будут находиться в допустимых пределах с учетом коэффициентов безопасности и запасов прочности [18]. Фактически такой подход к оценке показателя вероятности безотказной работы соответствует

определению надежности с учетом конструктивных запасов так, чтобы с допустимым доверием гарантировать нахождение значений рассматриваемых параметров в допустимой области [17, 44].

Таким образом, основная задача при выявлении возможных причин редких отказов – выполнить на системной основе квалифицированный анализ по определению функциональности, работоспособности и надежности изделия с учетом критичных выходных параметров и вероятностных показателей, влияющих на выполнение требуемых функций с допустимой вероятностью отказов. Решение такой задачи достижимо с использованием обобщенной параметрической модели функционирования [17, 36, 37, 44] и не противоречит действующему нормативному обеспечению.

Пути достижения системности анализа

Анализ по определению функциональности, работоспособности и надежности изделия проводят на основе данных о режимах и условиях применения изделия и текущего состояния конструкторской документации (в состоянии «как она есть») с учетом заложенных в ней требований к изготовлению и проведению технического контроля [5]. Эффективность такого анализа является максимальной, если производить его исходя из служебного назначения – главной задачи, для решения которой создается изделие, включающей (помимо общих целей проектирования) все дополнительные условия, ограничения и требования, которые эту задачу количественно уточняют и конкретизируют [46]. После установления служебного назначения строится дерево частных задач для составных частей изделия, обеспечивающих решение главной задачи. На основе каждой из частных задач формулируют требуемые функции (определяемые вопросом «что делает объект или отдельные его элементы?»), каждая из которых является внешним проявлением свойств изделия строго определенной физической природы в заданных режимах и условиях применения. Полученное таким образом дерево требуемых функций является необходимым и достаточным условием для обоснования заданной работоспособности и надежности изделия на базе инженерных дисциплин и конструкторско-технологических способов обеспечения его надежности.

После построения дерева требуемых функций становится возможным определение потенциальных отказов в виде вербального описания гипотетических событий, препятствующих выполнению соответствующих функций. Далее определяют условия, которые делают отказы невозможными (условия безотказности). Поиск этих условий производится методом отрицательных суждений (антитезисов). Логическая схема проведения такого метода строится на предвзятом суждении, что отказ какого-либо критичного элемента уже «произошел». Если

при конструировании предприняты и документально подтверждены необходимые и достаточные меры, которые позволяют устранить причину возможного отказа, то это служит доказательством того, что означенное отрицательное суждение ложно и, следовательно, условие безотказности обеспечено. Под условием безотказности понимают каждое из свойств конкретного критичного элемента, которое делает соответствующую причину отказа невозможной [47]. Важно, что при таком подходе свойства критичных элементов, от которых зависит безотказность, выявляются автоматически на базе сугубо инженерных подходов (без учета субъективного мнения «экспертов»).

Сам по себе перечень свойств критичных элементов позволяет характеризовать каждый критичный элемент количественно, в зависимости от выбранной модели его функционирования – вероятностно-статистической или физической [17]. Причем, если поведение критичного элемента можно охарактеризовать физическими величинами, то для описания свойств критичного элемента выбирают выходные параметры, в максимальной степени описывающие физическую природу в заданной системе отношений данного элемента в изделии и в целом изделия во внешней среде. Данная процедура в полной мере соответствует требованиям ГОСТ Р 58629. Если же модель не позволяет характеризовать функционирование критичного элемента с помощью физических величин (не хватает знаний о физической природе отказов), то для описания свойства критичного элемента выбирают показатель в виде вероятности отказов при выполнении требуемой функции на основе «черного ящика» или логико-вероятностных моделей. При необходимости параметры и вероятностные показатели функционирования объекта могут быть приведены к согласованному безразмерному виду (когда параметры можно представить в виде вероятности изменения своих значений в допустимых пределах, по аналогии с пояснениями в справочном приложении к ГОСТ 27.002–89 [18]). Это дает возможность производить оценку прогнозной (плановой) надежности изделия методом расчета надежности по вероятностям выполнения компонентами и элементами требуемых функций [17].

Анализ надежности высокоответственных невосстанавливаемых изделий с малой наработкой

На основе изложенного подхода разработана методика конструкторско-технологического анализа надежности (КТАН) [5, 15–17, 36, 37, 44], применение которой не отменяет ни одну из инженерных практик, но развивает и дополняет их, давая возможность:

- уйти от концепции случайности причин отказов и установить их логико-математической связью с конструктивно-технологическими факторами;

- установить связь выходных параметров функционирования с вероятностью отказов;
- определить конструкторские и технологические риски возникновения отказов, которые традиционными методами аналитической и экспериментальной верификации выявить невозможно;
- своевременно обнаружить редкие причины возможных отказов;
- сократить число потенциальных отказов конструкционного характера на ранних стадиях жизненного цикла и т. п.

Несмотря на то, что методика конструкторско-технологического анализа надежности (КТАН) подразумевает оценку (расчет) надежности, в первую очередь ее следует рассматривать как комплекс конструкторско-технологических и организационных мероприятий по исключению (снижению вероятности) отказов, основанный на анализе технической документации, который включает:

- постановку задач для проведения расчетов (выполнение необходимых и достаточных расчетов параметров работоспособности и надежности по заданным критериям для максимального снижения вероятности необоснованных рисков возникновения возможных отказов);
- постановку задач для экспериментальной отработки, включающую опытное определение значений параметров, которые не могут быть получены в результате расчетов из-за отсутствия необходимых данных, и подтверждение требуемых параметров работоспособности при наземной экспериментальной отработке, когда количество поставляемых на испытания объектов ограничено по финансово-экономическим соображениям;
- установку необходимых и достаточных требований в конструкторской документации для изготовления и эксплуатации изделий;
- получение контрольного списка (чек-листа) выходных параметров конструкции, по которым проводят проверки качества и надежности изделий;
- планирование мероприятий по предупреждению отказов конструкционного характера на всех стадиях жизненного цикла;
- итерационный подсчет (калькулирование) прогнозируемой надежности в результате проведения требуемых мероприятий по предупреждению отказов конструкционного характера;
- оценку конструкторско-технологических решений на соответствие заданным требованиям к надежности.

Использование конструкторско-технологического анализа надежности (КТАН) создает условия, при которых обеспечение надежности становится естественной и неотъемлемой частью работы конструкторов, позволяющей принимать инженерные решения сообразно заданным требованиям надежности (а не в отрыве от них, как это происходит при использовании статистических подходов к надежности). При этом, в отличие от анализа видов, последствий и критичности отказов (FMECA),

предназначенного для выявления и оценки критичности дефектов и несоответствий изделий (по результатам выполнения производственных процессов или процедур), КТАН служит для верификации решений конструктора с учетом технологических ограничений (направленных на предотвращение причин возникновения возможных отказов на физическом уровне, до того, как изделие будет изготовлено).

Методика КТАН опробована при конструировании механических устройств одноразового срабатывания космического назначения и узлов гидроавтоматики технологического оборудования нефтяных скважин [5, 15]. Причем такой анализ всегда проводился после завершения экспериментальной отработки (и даже летной квалификации), принятой в организации-разработчике механизмов согласно установленной нормативной документации. Тем не менее, анализы позволили на практике выявить конструкторские и технологические ошибки в технической документации; дать оценку эффективности существующей расчетно-экспериментальной отработки конструкции изделий; оценить достаточность установленных требований в конструкторской документации; выявить недопустимые сочетания параметров конструкций исходя из конструктивных ограничений, реальных условий изготовления и контроля; сделать выводы об отказоспособности изделий; произвести прогнозную оценку выполнения заданных требований к надежности; выдать рекомендации по изменению конструкции для обеспечения заданной надежности изделий. Фактически проведение КТАН позволяет выявить и устранить недостатки традиционных методов проектирования, конструирования и экспериментальной отработки для достижения заданной надежности [5, 15].

Заключение

Для высокоответственных невосстанавливаемых изделий космического назначения с малой наработкой (в первую очередь, механических устройств КА одноразового срабатывания) требования безотказности разумно рассматривать главным образом с позиций финансово-экономических, безопасностных и имиджевых рисков утраты КА. С точки зрения инженера-конструктора число девяток после запятой (с учетом округления до меньшего числа девяток для повышения достоверности) следует воспринимать как индикатор для применения подходов к обеспечению требуемой безотказности при разработке изделия.

При двух заданных девятках после запятой вполне приемлемо использовать методики аналитической и экспериментальной верификации, принятые в ракетно-космической отрасли, – выполнение расчетов надежности статистическими методами современной теории надежности и параметров работоспособности (из рекомендуемого перечня номенклатуры расчетов по ОСТ 92-0290), использование методологии FMEA-анализа и концепции

Stage-Gate, проведение наземной экспериментальной отработки на единичных отработочных макетах для каждого вида воздействий [5–8, 27–31, 35, 38–43].

При увеличении числа требуемых девяток целесообразно дополнительно применять методики раннего предупреждения отказов, одной из которых является КТАН, дающий возможность конструктору принимать обоснованные технические решения на основе инженерных дисциплин и конструкторско-технологических способов обеспечения качества и надежности [5, 15–17, 36, 37, 44].

Выбор одной из двух указанных стратегий обеспечения надежности определяется исключительно осознанием и пониманием разработчиком потенциальных опасностей, что дает возможность управлять рисками возникновения возможных редких отказов либо обоснованно отказаться от такой возможности.

Библиографический список

1. Spacecraft Systems Engineering // P. Fortescue, J. Stark, G. Swinerd. NJ.: John Wiley & Sons, 2003. 704 p.
2. Always P. Rockets of the Wold. Published by Saturn Press, 1999. 384 p.
3. Севастьянов Н.Н. Управление надежностью космических аппаратов с длительными сроками эксплуатации // Космонавтика и ракетостроение. 2017. № 3. С 133–148.
4. Горбенко А.В., Засуха С.А., Рубан В.И. и др. Безопасность ракетно-космической техники и надежность компьютерных систем: 2000–2009 гг. // Авиационно-космическая техника и технология. 2011. № 1. С. 9–20.
5. Похабов Ю.П. Теория и практика обеспечения надежности механических устройств одноразового срабатывания. Красноярск: СФУ, 2018. 338 с.
6. Патраев В.Е. Методы обеспечения и оценки надежности космических аппаратов с длительным сроком активного существования. Красноярск: СибГАУ, 2010. 136 с.
7. Патраев В.Е., Халиманович В.И. Надежность космических аппаратов космического обеспечения. Красноярск: СибГАУ, 2016. 208 с.
8. Патраев В.Е., Шангина Е.А. Надежность технических систем космических аппаратов. Красноярск: СФУ, 2019. 66 с.
9. Космические аппараты [Электронный ресурс] // АО «ИСС» имени академика М.Ф. Решетнева: сайт. URL: iss-reshetnev.ru (15.03.2021).
10. Запуски: база данных [Электронный ресурс] // Ракеты-носители, спутники, самолеты, приборы: сайт. URL: http://ecoruspace.me/ (15.03.2021).
11. Saleh J.H. & Caster J.-F. Reliability and Multi-State Failures: A Statistical Approach, First Edition. NJ.: John Wiley & Sons, 2011. 206 p.
12. ATR-2009(9369)-1. Critical Clearances in Space Vehicles / Brian W. Gore. The Aerospace Corporation. 2008. 31 October. 41 p.
13. Hecht H. & Hecht M. Reliability prediction for spacecraft, Report prepared for Rome Air Development Center, no. RADC-TR-85-229, Dec. 1985. 156 p.
14. Туманов А.В., Зеленцов В.В., Щеглов Г.А. Основы компоновки бортового оборудования космических аппаратов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. 344 с.
15. Модель и методика оценки влияния плановых мероприятий по предупреждению отказов конструкционного характера на надежность космических аппаратов в части отказов их механических устройств одноразового срабатывания. Инв. № 532-ОТ-МКБ-0031-19. № ГР 1920730200892217000241851. Железногорск: АО «НПО ПМ МКБ», 2019. 220 с.
16. Похабов Ю.П. Проблемы надежности и пути их решения при создании уникальных высокоответственных систем // Надежность. 2019. Т. 19. № 1. С. 10–17.
17. Похабов Ю.П. Надежность: взгляд конструктора // Надежность. 2020. Т. 20. № 4. С. 13–20.
18. Приложение (справочное) // ГОСТ 27.002–89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. М.: Изд-во стандартов, 1990. 37 с.
19. Рябинин И.А. Академик А.И. Берг и проблемы надежности, живучести и безопасности // Академик Аксель Иванович Берг (К столетию со дня рождения). М. Гос. политехн. музей, 1993. С. 6–25.
20. Рябинин И.А. Основы теории и расчета надежности судовых электроэнергетических систем. Л.: Судостроение, 1971. 456 с.
21. Болотин В.В. Применение методов теории вероятности и теории надежности в расчетах сооружений. М.: Стройиздат, 1971. 255 с.
22. Волков Л.И., Шишкевич А.М. Надежность летательных аппаратов. М.: Высш. школа, 1975. 296 с.
23. Тимашев С.А., Похабов Ю.П. Новые методы анализа и оценки надежности изделий ракетно-космической техники // Безопасность и мониторинг техногенных и природных систем: материалы и доклады / VI Всероссийская конференция (18–21 сентября 2018, Красноярск). Красноярск: СФУ, 2018. С. 254–259.
24. «Роскосмос» снизит цены на пуск ракет на 30% из-за демпинга SpaceX Маска [Электронный ресурс] // РосБизнесКонсалтинг: сайт. URL: https://www.rbc.ru/technology_and_media/10/04/2020/5e90869c9a7947d4640156b7 (15.03.2021).
25. Крылов А.М. Сравнительный анализ космической деятельности России, Китая и Индии [Электронный ресурс] // МКК: сайт. [2010]. URL: http://mosspaceclub.ru/base/base.php (15.03.2021).
26. Белозерцев А.И., Эль-Салим С.З. Детерминированная модель повышения надежности аналитических систем // Надежность и качество: труды международного симпозиума. 2017. Т. 2. С. 396–399.
27. Кузнецов А.А. Надежность конструкции баллистических ракет. М.: Машиностроение, 1978. 256 с.
28. Кузнецов А.А., Золотов А.А., Комягин В.А. и др. Надежность механических частей конструкции летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1979. 144 с.

29. Шатров А.К., Назарова Л.П., Машуков А.В. Механические устройства космических аппаратов. Конструктивные решения и динамические характеристики. Красноярск: СибГАУ, 2006. 84 с.

30. Шатров А.К., Назарова Л.П., Машуков А.В. Основы конструирования механических устройств космических аппаратов. Конструктивные решения, динамические характеристики. Красноярск: СибГАУ, 2009. 144 с.

31. Романов А.В., Тестоедов Н.А. Основы проектирования информационно-управляющих и механических систем космических аппаратов. СПб.: Профессионал, 2015. 240 с.

32. Postma R.W. Force and torque margins for complex mechanical systems / Proceedings of the 37th Aerospace Mechanisms Symposium, Johnson Space Flight Center, May 19–21, 2004. P. 107–118.

33. Space Vehicle Mechanisms – Elements of Successful Design, Edited by Peter L. Conley. NJ.: John Wiley & Sons, 1998. 794 p.

34. Dhillon B.S., Singh C. Engineering reliability. NJ.: John Wiley & Sons, 1981. 339 p.

35. Колобов А.Ю., Дикун Е.В. Интервальные оценки безотказности единичных космических аппаратов // Надежность. 2017. № 4. С. 23–26.

36. Похабов Ю.П. Надежность в цифровых технологиях // Надежность. 2020. Т. 20. № 2. С. 3–11.

37. Похабов Ю.П. Проектирование сложных изделий с малой вероятностью отказов в условиях Индустрии 4.0 // Онтология проектирования. 2019. Т. 9. № 1 С. 24–35.

38. Космические вехи: сб. науч. тр., посвященный 50-летию создания ОАО «ИСС» им. академика М.Ф. Решетнева». Красноярск: ИП Суховольская Ю.П., 2009. 704 с.

39. Design for reliability / Edited by Dana Crowe et al. NJ.: CRC Press LLC, 2001. 220 p.

40. Доронин С.В., Похабов Ю.П. Подходы к выбору расчетных случаев нагружения силовых конструкций технических объектов // Безопасность и мониторинг природных и техногенных систем: материалы и доклады / VII Всероссийская конференция (5–9 октября 2020, Кемерово); научн. ред. В.В. Москвичев. Новосибирск: ФИЦ ИВТ, 2020. С. 43–46.

41. Писцова Ю.П., Николаева Н.Г., Приймак Е.В. и др. Анализ видов и последствий несоответствий

(FMEA) конструкторской документации // Вестник Казанского технологического университета. 2004. № 1. С. 411–415.

42. Исаев С.В. Такой FMEA нам не нужен! (проблемы при внедрении и «детские» ошибки) // Методы менеджмента качества. 2008. № 3. С. 30–32.

43. Анализ видов и последствий потенциальных отказов (дефектов) FMEA [Электронный ресурс] / авт.-сост. М.С. Стенгач, А.А. Горбунов, В.Н. Кобзев. Самара, 2011. 1 эл. опт. диск (CD-ROM).

44. 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.

45. Тарасенко Ф.П. Прикладной системный анализ. М.: КНОРУС, 2017. 322 с.

46. Проектирование технологий автоматизированного машиностроительного производства / И.М. Баранчукова, А.С. Гусев, Ю.Б. Крамаренко и др. М.: Высш. шк., 1999. 416 с.

47. Герсеванов Н.М. Применение математической логики к расчету сооружений / Н.М. Герсеванов. Собр. соч. М.: Стройвоенмориздат, 1948. Т. 1. С. 123–203.

Сведения об авторе

Юрий Павлович Похабов – кандидат технических наук, Открытое акционерное общество «НПО ПМ – Малое Конструкторское Бюро» (ОАО «НПО ПМ МКБ»), начальник центра научно-технических разработок, Железногорск, Красноярский край, Российская Федерация, e-mail: pokhabov_yury@mail.ru

Вклад автора в статью

В статье рассмотрены вопросы обеспечения надежности высокоответственных невосстанавливаемых изделий с малой наработкой на основе одной из методик раннего предупреждения отказов конструкционного характера. Статья является развитием идей автора, изложенных в журналах «Надежность» за 2020 г. – № 2 и № 4.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.