

Что понимать под расчётом надёжности уникальных высокоответственных систем применительно к механизмам одноразового срабатывания космических аппаратов

Юрий П. Похабов, Акционерное общество «НПО ПМ – Малое Конструкторское Бюро» (АО «НПО ПМ МКБ»), Железнодорожск, Красноярский край, Россия



Юрий П. Похабов

Резюме. Цель. Расчёты являются неотъемлемой частью разработки любого сложного технического объекта. Обычно они подразделяются на расчёты, подтверждающие работоспособность изделия (кинематические, электрические, тепловые, прочностные, расчёты гидравлических и пневматических систем и пр.), и расчёты, подтверждающие его надёжность (расчёты показателей безотказности, долговечности, ремонтпригодности, сохраняемости и пр.). При этом под расчётами надёжности понимаются и нормативно закреплённые процедуры определения значений показателей надёжности объекта с использованием методов, основанных на их вычислении по справочным данным о надёжности элементов объекта, по данным о надёжности объектов-аналогов, данным о свойствах материалов и другой информации, имеющейся к моменту расчёта. Однако в случае разработки уникальных высокоответственных систем получить статистические данные для расчёта надёжности не представляется возможным из-за двух взаимоисключающих условий: ограниченного числа создаваемых объектов и высокой точности требуемой исходной информации. Тем не менее, по мнению автора, расчёты надёжности должны проводиться, вопрос заключается только в том, как считать надёжность и что под таким расчётом понимать. **Методы.** В классической теории надёжности под вероятностью безотказной работы принято понимать частоту наступления отказов во времени, но для уникальных высокоответственных систем частота отказов должна стремиться к нулю за весь срок эксплуатации (желательно чтобы отказов вообще не было). По этой причине к понятию «отказ» для уникальных высокоответственных систем разумнее относиться не как к событию – всякому факту, который в результате опыта может произойти или не произойти, а как к возможному риску – нежелательной ситуации или обстоятельству, характеризующемуся вероятностью возникновения и потенциально негативными последствиями. Тогда событию в виде реального или потенциального отказа при эксплуатации можно сопоставить риск в виде вероятности возникновения отказа с негативными последствиями, что с позиций последствий отказов для уникальных высокоответственных систем одинаково недопустимо. В этом случае расчёт надёжности без потери смыслов может быть заменён оценкой риска – процессом, охватывающим идентификацию риска, анализ риска и сравнительную оценку риска. Таким образом, с помощью оценки рисков появляется возможность достигать заданной надёжности напрямую путём обоснования стабильности проявления свойств конкретного изделия, а не опосредованно через ненадёжность, как следствие отказов объектов-аналогов. **Результаты.** Приведена последовательность проведения оценки риска для уникальных высокоответственных систем. На примере механической системы с подвижными узлами в виде однозвенной поворотной штанги космического аппарата показаны процедуры проведения оценки риска. Представлена возможность проведения оценки риска с применением конструкторско-технологического анализа надёжности. **Выводы.** Показано, что отсутствие статистических данных о надёжности образцов-аналогов уникальных высокоответственных систем не является препятствием для проведения расчётов надёжности в виде оценки риска. Более того, результаты таких расчётов могут быть источником и руководством для принятия конструкторских и технологических решений при разработке и создании изделий с заданной надёжностью. Однако для легализации методики проведения таких расчётов необходима корректировка нормативно-технической документации, позволяющая производить расчёты надёжности иными методами, нежели с использованием статистических данных об отказах образцов-аналогов.

Ключевые слова: уникальная высокоответственная система, расчёт, расчёт надёжности, оценка риска, конструкторско-технологический анализ надёжности.

Формат цитирования: Похабов Ю.П. Что понимать под расчётом надёжности уникальных высокоответственных систем применительно к механизмам одноразового срабатывания космических аппаратов // Надёжность. 2018. Т. 18, № 4. С. 28-35. DOI: 10.21683/1729-2646-2018-18-4-28-35

Введение

Разработка любых сложных технических изделий невозможна без проведения расчётов – *установления и подсчёта необходимых данных* [1]. Расчёты в виде *документов, содержащих расчёт параметров и величин, например, расчёт размерных цепей, расчёт на прочность и др.*, входят в номенклатуру конструкторской документации по ГОСТ 2.102. Коды и виды расчётов для изделий машиностроения определены в отраслевом стандарте ОСТ 92-0290. В общем виде, например, согласно ГОСТ 2.119, расчёты разделяются на расчёты, подтверждающие работоспособность изделия (кинематические, электрические, тепловые, прочностные, расчёты гидравлических и пневматических систем и пр.) и расчёты, подтверждающие его надёжность (расчёты показателей безотказности, долговечности, ремонтпригодности, сохраняемости и пр.). Причём в нормативно-технической документации (ГОСТ 27.301 и ГОСТ 27.410) под расчётами надёжности понимаются только *процедуры определения значений показателей надёжности объекта с использованием методов, основанных на их вычислении по справочным данным о надёжности элементов объекта, по данным о надёжности объектов-аналогов, данным о свойствах материалов и другой информации, имеющейся к моменту расчёта*. Что немаловажно, наличие расчётов надёжности на основании справочных данных о надёжности объектов-аналогов несёт юридические и финансовые последствия при страховании рисков утраты объектов [2]. Однако в случае разработки уникальных высокоответственных систем (УВС) получить статистические данные для расчёта надёжности не представляется возможным из-за двух взаимоисключающих условий: ограниченного числа создаваемых объектов и высокой точности требуемой исходной информации. Несмотря на существующее мнение о том, что для абсолютно надёжных систем не имеет смысла делать расчёты надёжности и их следует заменить выполнением качественных критериев надёжности [3], по мнению автора, нет альтернативы, делать или не делать расчёты надёжности при разработке УВС. Существует лишь вопрос, как считать надёжность и что под таким расчётом понимать.

Актуальность проведения расчёта надёжности УВС видна на примере срабатывания одноразовых механизмов космических аппаратов. Эффективность функционирования космических аппаратов на орбите целиком зависит от успешности раскрытия панелей солнечных батарей и космических антенн (рефлекторов), стоимость которых составляет ничтожную долю от суммарных затрат на космический аппарат и средства его выведения. Экспериментальное подтверждение надёжности раскрытия конструкций невозможно из-за высоких требований к безотказности (на уровне 0,9995 и выше) и уникальных внешних условий раскрытия на орбите, которые невозможно в точности воспроизвести при проведении наземной экспериментальной отработки. В то же время

практически любая ошибка при конструировании и изготовлении механизмов раскрытия способна привести к отказу, что может закончиться гибелью космического аппарата. Поэтому надёжность в данном случае во многом определяется именно расчётами.

Подходы к проведению расчётов надёжности

Поскольку отказы УВС приводят к потерям несоизмеримо большим, чем затраты на их создание [4], надёжность характеризуется безотказностью и определяется показателем вероятности безотказной работы (ВБР), т.е. *вероятностью того, что в пределах заданной наработки отказ объекта не возникнет* [5, 6]. В классической теории надёжности под ВБР принято понимать частоту наступления отказов во времени, но для УВС частота отказов в теории должна стремиться к нулю за весь срок эксплуатации (желательно чтобы отказов вообще не было). По этой причине к понятию «отказ» для УВС разумнее относиться не как к **событию** – *всякому факту, который в результате опыта может произойти или не произойти* [7], а как к возможному **риску** – *нежелательной ситуации или обстоятельству, характеризующимся вероятностью возникновения и потенциально негативными последствиями* [8]. Причём для механизмов одноразового срабатывания космических аппаратов имеет смысл говорить о риске как *влиянии неопределённости на цели*, где под неопределённостью понимается *«состояние полного или частичного отсутствия информации, необходимой для понимания события, его последствий и их вероятностей»* [9]. Тогда **событие** в виде реального или потенциального отказа при эксплуатации можно рассматривать как **риск** (вероятность возникновения отказа с негативными последствиями), что с позиций последствий отказов для УВС одинаково недопустимо. В этом случае **расчёт надёжности** без потери смысла может быть заменён **оценкой риска** – *процессом, охватывающим идентификацию риска, анализ риска и сравнительную оценку риска* [10]. Важно отметить, что риски отказов не несут в себе частотного смысла, но оценка риска позволяет прогнозировать сценарии развития нежелательных ситуаций, способных привести к отказам, и на основании таких оценок принимать технические решения при разработке УВС. Таким образом, с помощью оценки рисков появляется возможность достигать заданной надёжности напрямую путём обоснования стабильности проявления свойств конкретного изделия [11], а не опосредованно через ненадёжность, как следствие отказов объектов-аналогов [12].

Отход от понятия «событие» как факта *нарушения работоспособного состояния объекта* [5, 6] при расчёте надёжности делает чувствительным понимание сущности понятия «надёжность» к её терминологическому определению. По мнению автора, смещение нормативного определения термина «надёжность» в сторону

функционального толкования уводит от возможности понимать надёжность иначе, чем принято в рамках существующего математического аппарата теории надёжности. Употребление понятия «функция» в терминологическом определении надёжности как требований, установленных в нормативной, конструкторской, проектной, контрактной и иной документации на объект [6], приводит к абстрагированию физических процессов, происходящих в конструкции изделий, и как следствие не создаёт предпосылок для проведения анализа рисков. Например, раскрытие складных космических аппаратов на орбите в организационно-технической документации рассматривается как функция, обеспечивающая подготовку аппарата к работе в течение заданного срока активного существования, но на физическом уровне достигается спланированной и последовательной работой множества конструктивных элементов, обеспечивающих выполнение данной функции. Функциональное определение надёжности фактически делает «невидимой» работу конструктивных элементов, обеспечивающих в конечном итоге надёжность при выполнении функции раскрытия складных конструкций космического аппарата.

По мнению автора, определение надёжности как *свойства системы сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров и/или показателей, характеризующих способность системы выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования* [13], даёт единое понимание (непротиворечивость) параметрического и функционального определения надёжности [14] и позволяет производить оценку надёжности как с позиций классической теории надёжности, так и с позиций анализа рисков возникновения отказов. Это становится осуществимым благодаря тому, что появляется возможность рассматривать надёжность как физическую величину с присущими ей простыми и/или существенными свойствами, которые могут быть выражены с помощью параметрических или непараметрических моделей через параметры и/или показатели [11].

В основе методики проведения анализа риска, связанного с возникновением отказов УВС лежат принципы физичности (закономерности причинно-следственных связей) и физической необходимости (непротиворечия законам природы) причин отказов. Задачей анализа рисков при использовании указанных принципов становится анализ и синтез простых свойств, составляющих (существенное) свойство надёжности, что становится возможным благодаря парадигме А.И. Уёмова о триединстве вещей, их свойств и отношений [15], и расширенному толкованию понятия «отношение» как взаиморасположения, взаимосвязи и взаимодействия вещей (предметов, объектов и пр.) [11]. Связь между параметрической и непараметрической природой проявления функций в объектах обнаруживается, если использовать термин «функционирование» из некогда

аннулированного стандарта ГОСТ 22487 в значении *«выполнение в объекте (системе) процесса (процессов), соответствующего (соответствующих) заданному алгоритму и (или) проявление объектом заданных свойств»*. В этом случае предписанные организационно-технической документацией функции [6] на физическом уровне могут быть представлены в виде проявления объектом заданных свойств в соответствии с заданным алгоритмом выполняемого процесса. Данное обстоятельство чрезвычайно важно для сложных технических систем, где при функционировании могут одновременно или последовательно проявляться множество свойств, приводящих к выполнению или невыполнению функций, заданных в организационно-технической документации.

Такой подход расширяет возможности классической теории надёжности, применяемой при прочностных расчётах надёжности, позволяя дополнительно производить оценку функционирования изделий по механическим, кинематическим, энергетическим, электрическим и иным параметрам [16]. Причём поскольку на уровне определённой иерархии физические свойства являются независимыми (например, свойства прочности и электропроводности), то в рамках рассмотрения любого из свойств, выявленных в ходе анализа рисков, становится возможным как детерминированный, так и стохастический подход при количественной оценке конкретного рассматриваемого свойства надёжности.

При оценке рисков, в отличие от классических расчётов надёжности, становится возможным исключать неопределённости при разработке изделия, т.е. принимать во внимание то обстоятельство, что задумка конструктора должна быть отражена в конструкторской документации так, чтобы его мысль была понятна лицам, не участвовавшим в разработке и не знакомым с исходными идеями без дополнительных разъяснений и комментариев и, тем более, без утраты смыслов. Чаще всего неопределённости могут быть скрыты в восприятии термина «работоспособное состояние», который определяется как *состояние объекта, в котором он способен выполнять требуемые функции* [6]. С учётом пояснения того, что понимается под функцией в термине «надёжность», данном в Государственном стандарте, невозможно квалифицировать работоспособное состояние как достаточное для выполнения служебного назначения изделия. Ситуацию в каком-то степени проясняет пояснение к термину «работоспособное состояние», согласно которому оно может быть определено как *состояние объекта, в котором значения всех параметров, характеризующих способность выполнять заданные функции, соответствует требованиям, установленным в документации на этот объект* [6]. Это, безусловно, более конкретное определение работоспособного состояния для сложного технического объекта, но и оно грешит серьёзными неточностями. Во-первых, для УВС требования в документации должны быть необходимыми и достаточными, но каким образом этого достичь,

Государственный стандарт не поясняет, что, безусловно, повышает роль человеческого фактора при разработке (кому-то кажется, что требования достаточны для достижения работоспособного состояния изделия, а кому-то – нет). Во-вторых, первичным документом для изготовления изделия является конструкторская документация, а не какая-нибудь *иная документация*, как это трактует всё тот же стандарт. В этом смысле отказ от прежнего определения термина «работоспособное состояние» [5], где чётко фигурирует конструкторская документация, никак не способствует снижению роли того же человеческого фактора (из-за размывания понятий).

Пример и последовательность проведения оценки риска

Рассмотрим пример проведения оценки риска в общем виде. В соответствии с определением термина «оценка риска» [10] на первом этапе проводится *идентификация риска*, которая заключается в выявлении источника риска и возможных причин отказов. На данном этапе определяется функциональность изделия на физическом уровне согласно ГОСТ 28806 в виде *наличия и конкретных особенностей набора функций, способных удовлетворить заданные или подразумеваемые потребности*. Целью данной процедуры является словесное описание отказов как гипотетических ситуаций, препятствующих выполнению конкретных рассматриваемых функций. Предполагается, что каждый из потенциальных отказов происходит из-за причин, непосредственно их порождающих, которые возникают, существуют и развиваются в условиях окружающей действительности как совокупности факторов внешней среды и режимов работы с учётом худших возможных сочетаний. Очевидно, что каждому виду отказов может соответствовать одновременно несколько причин. Выявленные возможные причины отказов в своей совокупности являются базой для составления контрольного списка (чек-листа) при идентификации рисков. Здесь важно понимать, что процедуры идентификации риска определяют полноту выявленной функциональности объекта и должны выполняться специалистами с соответствующей квалификацией, поскольку результаты выполнения этих процедур используются для наполнения чек-листа и служат в конечном итоге критериями для установления необходимых и достаточных требований в конструкторской документации.

На последующем этапе оценки рисков проводится анализ, который подготавливает информационную базу для сравнительной оценки рисков и принятия решения по воздействию на их источники. Процедуры проведения анализа риска подчинены следованию заданному алгоритму в строгом соответствии с общей логикой действий согласно чек-листу (в данном случае выявленные причины отказов являются отправной точкой для всех дальнейших действий при анализе и оценке рисков):

- определяются свойства критичных элементов конструкции, наличие которых делает невозможной каждую из причин отказов;

- каждое из свойств критичных элементов определяется количественно с помощью параметров (показателей);

- каждому параметру (показателю) определяется диапазон допустимых значений исходя из требований технического задания на разработку (представления изделия с точки зрения заказчика) и конструктивному исполнению изделия (представления конструкции изделия с точки зрения разработчика);

- значение каждого параметра внутри допустимого диапазона обосновывается расчётно-экспериментальными методами с позиций работоспособности и надёжности;

- производится оценка надёжности с применением метода структурной схемы надёжности для подтверждения того, что выбранные значения параметров (показателей) соответствуют требованиям технического задания;

- осуществляется проверка условий работоспособности на соответствие значений параметров требованиям нормативно-технической и конструкторской документации (для каждого параметра должно быть предусмотрено соответствующее требование для изготовления и/или эксплуатации, выполнение которого может быть проверено средствами технического контроля);

- выявляются риски, связанные с возникновением отказов вследствие не установления требований в рабочей конструкторской и технологической документации в состоянии «как она есть»;

- делается анализ вероятности возникновения отказов, связанных с недооценкой конструкторских и/или технологических ошибок при разработке рабочей документации для принятия окончательного решения о соответствии конструкции и рабочей документации заданным требованиям надёжности.

На завершающем этапе оценки риска производится сравнение значения выявленной вероятности отказов с заданными требованиями безотказности и, в случае необходимости, предпринимается действия, связанные с пересмотром технических решений и/или установлением дополнительных требований в рабочей документации.

Пример оценки риска

В качестве конкретного примера оценки риска рассмотрим механическую систему с подвижными узлами в виде однозвенной поворотной штанги космического аппарата, которая какое-то время закреплена на опорной поверхности с помощью замка зачековки, затем производится снятие механических связей в замке, штанга под действием приводов раскрывается на заданный угол, фиксируется в конечном положении и начинает работать

как консоль с заданными параметрами работоспособности [4]. Безотказность работы штанги обеспечивается за счёт последовательного выполнения её конструктивными элементами заданных функций, заключающихся в проявлении прочности штанги от нагрузок в зачехленном положении, недопущении несанкционированного снятия механических связей в замке, прохождении электрического сигнала на электрозапалы пиропатронов по заданной команде, срабатывании пироустройства, разделении механических связей в замке, отделении штанги от опорного основания, поворота штанги на заданный угол, фиксации и обеспечения заданных параметров штанги в рабочем положении. Конструктивные элементы поворотной штанги при раскрытии должны последовательно выполнить все указанные функции в заданных условиях и режимах эксплуатации. Нераскрытие штанги может быть обусловлено отказом при выполнении любой из функций, причём одновременно несколькими причинами, которые могут определяться не столько самими условиями и режимами эксплуатации, сколько сочетанием неблагоприятных факторов.

Рассмотрим в качестве примера функцию поворота штанги на заданный угол с помощью раскрывающего привода. Причинами отказа при выполнении рассматриваемой функции могут быть следующие условия: невключение или поломка привода (невключение), отсутствие необходимых запасов движущего момента (торможение), пропадание радиального зазора в шарнире вращения (запрессовка), исчезновение осевого зазора в шарнирном узле (заклинивание), возникновение внезапных препятствий на пути движения штанги (зацепление).

Очевидно, что каждая из причин отказов может быть парирована решениями и/или действиями разработчика штанги путём придания её конструкции таких свойств критичных элементов, которые позволят безусловно выполнить заданные функции. Например, для исключения или смягчения последствий:

- невключения привода – необходимо обеспечить предельную вероятность его безотказной работы за счёт резервирования критичных элементов конструкции;
- торможения штанги – создать требуемый запас движущего момента относительно момента сил сопротивления на пути её движения за счёт выбора энергетических характеристик привода;
- запрессовки шарнира – выбрать такие радиальные зазоры в подшипнике, чтобы при возможных изменениях толщины слоя твёрдого смазывающего покрытия и температурных деформациях была бы обеспечена свобода вращения;
- заклинивания в шарнирном узле – предусмотреть тепловую развязку в направлении оси вращения шарнира;
- зацепления – исключить все возможные помехи на пути движения штанги, вызванные условиями не-весомости, кинематикой движения или компоновкой смежных конструкций.

Для количественной оценки условий обеспечения работоспособности по каждому из выявленных свойств критичных элементов необходимо выбрать параметр (показатель), который в полной мере характеризует рассматриваемое свойство, и соответствующую ему допустимую область отклонений [16]. Причём область допустимых отклонений параметров (показателей) будет определяться требованиями технического задания на разработку (внешними параметрами) или внутренними параметрами конструирования (выбранными материалами, компоновочными и силовыми схемами, технологиями изготовления и т. п.) [17].

Приведём параметры (показатели) и их допустимые области, которые соответствуют безусловному выполнению функции поворота штанги на заданный угол в виде условий, исключающих или смягчающих последствия причин отказов для следующих рассматриваемых рисков:

- 1) невключения привода

$$P_d \geq P_{lim}, \quad (1)$$

где P_d – вероятность включения (работы) привода; P_{lim} – вероятность безотказной работы привода в соответствии с распределением заданного требования показателя надёжности штанги по элементам конструкции;

- 2) торможения штанги

$$M_d > M_c, \quad (2)$$

где M_d – движущий момент, развиваемый приводом раскрытия штанги; M_c – момент сил сопротивления на пути движения штанги;

- 3) запрессовки шарнира

$$\Delta_r = \delta - 2\delta_n - \delta_{pr} > 0, \quad (3)$$

где Δ_r – радиальный зазор в шарнире; δ – минимальный зазор в сопряжении между охватываемой и охватывающей деталями шарнира без учёта слоя смазки; δ_n – максимальная толщина твёрдой смазки с учётом её возможных изменений в процессе эксплуатации; δ_{pr} – предельное значение тепловых деформаций в радиальном зазоре при объёмном расширении (сжатии) охватываемой (охватывающей) деталей шарнира;

- 4) заклинивания в шарнирном узле

$$\Delta_{sh} > \Delta l, \quad (4)$$

где Δ_{sh} – осевой зазор в шарнирном узле; Δl – тепловая деформация, способная вызвать распорные усилия в конструкции шарнирного узла;

- 5) зацеплений штанги

$$Q_{st} \rightarrow 0, \quad (5)$$

где Q_{st} – вероятность зацепления штанги.

Выполнение каждого из условий (1)–(5) в процессе эксплуатации при заданных условиях и режимах может быть выражено в виде вероятностей того, что значения параметров (показателей) не превысят пределы допустимых ограничений за интервал наблюдения t и будут равны

$$P_1(t) = P(P_d \geq P_{lim}), \quad (6)$$

$$P_2(t) = P(M_d > M_c), \quad (7)$$

$$P_3(t) = P(\Delta_r > 0), \quad (8)$$

$$P_4(t) = P(\Delta_{sh} > \Delta l), \quad (9)$$

$$P_5(t) = 1 - Q_{st}. \quad (10)$$

Определение вероятностей (6)–(10) может быть произведено стохастическими или детерминированными методами. В первом случае производят вычисления вероятностей нахождения параметров в допустимой области методами теории надёжности, например методом индивидуальной надёжности [18] (что в конечном итоге не исключает возможность отказов, но способно дать представление о частоте их возможного проявления). Во втором случае обосновывают нахождение параметров в заданном допуске (принимают необходимые меры для исключения отказов) за счёт обеспечения конструктивных запасов (резервирования, запасов прочности и движущих моментов, параметрической избыточности, силовых и температурных развязок, процедур получения гарантированных результатов, в т. ч. с применением минимаксных критериев).

При детерминированном подходе для достижения вероятностей $P_i(t) \approx 1$, где $i = 1, 2, \dots, 5$, в выражении (1) необходимо обеспечить резервирование актуатора привода, например, для электромеханического привода – введение резервного электропитания мотора, а для механического привода – применение структурного резервирования; в выражении (2) – запасы движущих моментов, как правило, не менее 200 % для худшего сочетания условий применения при нулевой кинетической энергии штанги [19]; в выражении (3) – минимаксные критерии, основанные на ограничениях диапазонов реализации случайных параметров для худших условий их реализации [20]; в выражении (4) – тепловые развязки [21]; в выражении (5) – процедуры получения гарантированного результата, например с применением компьютерной симуляции [22].

В случае использования любого из методов (стохастического или детерминированного) вычисления вероятностей (6)–(10) надёжность успешного выполнения функции поворота штанги на заданный угол определяется по формуле

$$P(t) = \prod_{i=1}^n P_i(t), \quad (11)$$

где n – количество показателей, обеспечивающих безусловное выполнение функции поворота штанги на заданный угол; $P_i(t)$ – вероятность того, что i -й параметр ($i = 1, 2, \dots, 5$) не выйдет за пределы допустимых ограничений; t – интервал наблюдения.

Вычисленное значение (11) даёт теоретический показатель надёжности, который может отличаться от действительного, если в конструкторской и/или технологической документации будут отсутствовать какие-либо требования к изготовлению или они будут заданы некорректно для однозначного выполнения условий (1)–(5). К отсутствию, нечёткости или ненадлежащему исполнению требований в технической документации могут привести события, связанные с непроведением необходимых расчётов и испытаний, невнимательностью конструкторов при разработке чертежей, ограни-

чением сроков сдачи конструкторской документации в производство, несогласованностью действий между конструкторами и технологами и т. п.

Для снижения рисков, связанных с возникновением отказов из-за недостаточного объёма и нечёткости требований, необходимо проводить анализ конструкторской и технологической документации на соответствие полноты параметров (показателей), описывающих выполнение определённых функций, например (1)–(5), и требований, установленных для их реализации.

Нерелевантность параметров и требований конструкторской и/или технологической документации, риски невыполнения или ненадлежащего выполнения требований при изготовлении рассматриваются как события C_i , где индекс i соответствует i -му элементу рассматриваемой системы. Вероятность совершения каждого из таких событий может быть определена формулой:

$$P(C_i) = \alpha_i \cdot P_i(t), \quad (12)$$

здесь α_i – корректирующие коэффициенты, которые могут быть получены экспертным путём, например с использованием балльных оценок критичности отказов:

$$\alpha_i = 1 - Q_i,$$

где Q_i – ожидаемая вероятность отказа i -го элемента согласно шкале балльных оценок критичности отказов по ГОСТ 27.310.

Для вычисления окончательной вероятности выполнения функции поворота штанги на заданный угол с учётом состояния конструкторской и технологической документации (12) используют формулу

$$P(C) = \prod_{i=1}^n P_i(C_i). \quad (13)$$

Представленные процедуры для оценки вероятности осуществления функции поворота штанги на заданный угол могут быть применены при анализе каждой из указанных функций штанги при раскрытии, а вероятность их выполнения и общая вероятность безотказной работы штанги – оценена с помощью формул (11) и/или (13). Целесообразность применения указанных формул определяется требуемой точностью оценки надёжности [16]. Для оценки безотказности ниже трёх девяток вполне приемлемой может оказаться формула (11), а при требованиях к безотказности на уровне трёх девяток и выше необходимо применять формулу (13).

Оценка риска с применением конструкторско-технологического анализа надёжности

Методика анализа и оценки риска с учётом конструкторских и технологических решений (1)–(13) получила название методики конструкторско-технологического анализа надёжности (КТАН), основы которой приведены в работах [23, 24]. Наиболее полное представление о данной методике сводится к последовательному осуществлению определённых методов:

- Метод функционального анализа предназначен для выявления основных функций, обеспечивающих выполнение служебного назначения изделий, и определения возможных отказов, как следствий нарушения условий функционирования;

- Метод проведения анализа худшего случая – для выявления причин возможных отказов, включая худшие сочетания факторов технического состояния изделия, режимов и условий его эксплуатации;

- Метод парирования отказов – для выявления свойств критичных элементов изделия, при реализации которых причины отказов становятся невозможными;

- Метод параметризации конструкции изделия – для количественной характеристики свойств критичных элементов и определения областей допустимых значений, например (1)–(5);

- Метод обоснования параметров – для оценки вероятностей нахождения параметров функционирования в допустимой области, например (6)–(10);

- Метод оценки надёжности с использованием метода структурной схемы надёжности (11) – для принятия решения о соответствии выбранных параметров конструкции заданным требованиям надёжности;

- Метод установления необходимых и достаточных требований путём сплошного анализа конструкторской и технологической документации – для установления степени соответствия параметров функционирования установленным требованиям;

- Метод выявления рисков отказов вследствие не установления требований в конструкторской и/или технологической документации (12) – для выявления и оценки возможных отказов вследствие выполнения требований рабочей документации в состоянии «как она есть»;

- Метод оценки надёжности с учётом рисков, связанных с недооценкой конструкторских и/или технологических ошибок (если они обнаружатся), например, с использованием балльных оценок критичности отказов (13), – для принятия окончательного решения о соответствии конструкции заданным требованиям надёжности.

В зависимости от требуемой точности оценки надёжности, полученные значения вероятностей (11) или (13) сравнивают с заданными требованиями надёжности P_{pr} для выполнения условия

$$\forall P = [P(t) \vee P(C)] > P_{pr} \quad (14)$$

В случае невыполнения условия (14) необходимо повторить итерацию проведения процедур КТАН и сделать новые расчёты с уточнёнными исходными данными.

Следует отметить, что приведённый подход к расчёту надёжности (11)–(14) был разработан целенаправленно для раскрывающихся конструкций космических аппаратов и применительно к другим техническим объектам пока не применялся. Тем не менее, если сравнивать указанный подход с методикой расчёта надёжности механических частей поворотных

конструкций летательных аппаратов, основанной на классических подходах теории надёжности [25, 26], то он позволяет существенно расширить возможность учёта факторов неопределённости. Например, из пяти рассмотренных в статье причин отказов, в известных работах рассматривается лишь одна – «торможение штанги» (2), что вполне объяснимо – там не учитывались конструкторские и технологические решения как факторы неопределённости.

Заключение

Показано, что отсутствие статистических данных о надёжности образцов-аналогов УВС не является препятствием для проведения расчётов надёжности в виде оценки риска. Более того, результаты таких расчётов могут быть источником и руководством для принятия конструкторских и технологических решений при разработке и создании изделий с заданной надёжностью. Однако для легализации методики проведения таких расчётов необходима корректировка нормативно-технической документации, позволяющая производить расчёты надёжности иными методами, нежели с использованием статистических данных об отказах образцов-аналогов.

Библиографический список

1. Толковый словарь русского языка: в 4 т. Т. 3 / под ред. Д. Ушакова. – М.: ТЕРРА, 1996. – 712 с.
2. Термины космического страхования [Электронный ресурс] // Космическое страхование (страхование космических рисков: информационно-аналитический сайт. – Режим доступа: <http://www.space-ins.ru/index.php/kategoria8/8-terms.html>.
3. Половко А.М., Гуров С.В. Основы теории надёжности. – СПб.: БХВ-Петербург, 2006. – 704 с.
4. Похабов Ю.П., Ушаков И.А. О безаварийности функционирования уникальных высокоответственных систем // Методы менеджмента качества. – 2014. – №11. – С. 50–56.
5. ГОСТ 27.002–89. Надёжность в технике. Основные понятия. Термины и определения. – М.: Изд-во стандартов, 1990. – 37 с.
6. ГОСТ 27.002–2015. Надёжность в технике. Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2016. – 28 с.
7. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. – М.: Наука, 1969. – 576 с.
8. ГОСТ Р ЕН 9100–2011. Системы менеджмента качества организаций авиационной, космической и оборонных отраслей промышленности. Требования. – М.: Стандартинформ, 2012. – 23 с.
9. ГОСТ Р ИСО 31000–2010. Менеджмент риска. Принципы и руководство. – М.: Стандартинформ, 2012. – 26 с.
10. ГОСТ Р 51897–2011. Менеджмент риска. Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2012. – 16 с.

11. Похабов Ю.П. О философском аспекте надёжности на примерах уникальных высокоответственных систем // Надёжность. – 2015. – № 3. – С. 16–27.
12. Ван-Желен В. Физическая теория надёжности. – Симферополь: Крым, 1998. – 318 с.
13. Похабов Ю.П. О дефиниции термина «надёжность» // Надёжность. – 2017. – Т. 17, № 1. – С. 4–10.
14. Нетес В.А., Тарасьев Ю.И., Шпер В.Л. Как нам определить что такое «надёжность» // Надёжность. – 2014. – № 4. – С. 3–14.
15. Уёмов А.И. Вещи, свойства и отношения. – М.: Изд-во АН СССР, 1963. – 184 с.
16. Похабов Ю.П. Теория и практика обеспечения надёжности механических устройств одноразового срабатывания. – Красноярск: СФУ, 2018. – 340 с.
17. Чеботарёв В.Е. Проектирование космических аппаратов систем информационного обеспечения: в 2-х кн. Кн. 2. Внутреннее проектирование космического аппарата. – Красноярск: СибГАУ, 2005. – 168 с.
18. Тимашев С.А., Похабов Ю.П. Проблемы комплексного анализа и оценки индивидуальной конструкционной надёжности космических аппаратов (на примере поворотных конструкций): препринт / С.А. Тимашев, Ю.П. Похабов. – Екатеринбург: АМБ, 2018. – 38 с.
19. NASA Standard. Design and Development Requirements for Mechanisms (13 June 2006). NASA-STD-5017. – 30 p.
20. Основы проектирования космических аппаратов информационного обеспечения / В.Е. Чеботарёв, В.Е. Косенко. – Красноярск: СибГАУ, 2011. – 488 с.
21. Пат. 2230945 Российская Федерация. МПК F16B 1/00. Способ закрепления изделий / Ю.П. Похабов, В.В. Гриневич. – № 2002113143/11; заявл. 18.05.2002; опубл. 20.06.2004. Бюл. № 17.
22. Емельянов А.А. Путь от аналоговых моделей к симулятору на цифровом компьютере // Прикладная информатика. – 2007. – № 5. – С. 41–53.
23. Похабов Ю.П. Подход к обеспечению надёжности уникальных высокоответственных систем на примере крупногабаритных трансформируемых конструкций // Надёжность. – 2016. – № 1. – С. 24–36.
24. Похабов Ю.П. Обеспечение надёжности уникальных высокоответственных систем // Надёжность. – 2017. – Т. 17, № 3. – С. 17–23.
25. Кузнецов А.А. Надёжность конструкции баллистических ракет. – М.: Машиностроение, 1978. – 256 с.
26. Кузнецов А.А., Золотов А.А., Комягин В.А. и др. Надёжность механических частей конструкции летательных аппаратов. – М.: Машиностроение, 1979. – 144 с.

Сведения об авторе

Юрий П. Похабов – кандидат технических наук, Акционерное общество «НПО ПМ – Малое Конструкторское Бюро» (АО «НПО ПМ МКБ»), начальник центра научно-технических разработок, Россия, Красноярский край, Железногорск, e-mail: pokhobov_yury@mail.ru

Поступила: 16.04.2018