

Генезис надежности уникальных высокоответственных систем

Юрий П. Похабов, Открытое акционерное общество «НПО ПМ – Малое Конструкторское Бюро» (ОАО «НПО ПМ МКБ»), e-mail: pokhabov_yury@mail.ru

Олег К. Валишевский, Акционерное общество «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнёва» (АО «ИСС»), e-mail: valishevsky@iss-reshetnev.ru



Юрий П. Похабов



Олег К. Валишевский

Резюме. Цель. Предлагается взгляд на генезис надежности уникальных высокоответственных систем, характеризуемых малой вероятностью отказов, на примере трансформируемых конструкций космических аппаратов, для которых сама возможность отказов способна поставить под сомнение целесообразность их создания. Показано, на какой из стадий жизненного цикла уникальных высокоответственных систем меры по обеспечению их надежности максимально действенны, а когда уже поздно что-либо предпринимать.

Методы. Не учет генезиса уникальных высокоответственных систем неизбежно приводит к отказам на стадии эксплуатации изделий, причем отказы обусловлены ошибками проектирования, конструирования, моделирования, а также возникновением различного рода отклонений при производстве. На практике до 80% случаев отказов определяются еще до начала эксплуатации – «за кульманом» и в производственных цехах, когда что-то недодумали, не учли, где-то ошиблись, допустили брак, не проконтролировали т.д. Надежность будущих изделий зависит от качества принимаемых решений в процессе разработки, которые напрямую зависят от принципов, правил и требований, используемых при проектировании и конструировании. Указанные понятия взаимосвязаны и несут конкретную смысловую нагрузку. Принципы используются для выработки проектных решений. Правила являются переходным звеном от теории к практике и часто отражают полученный опыт, который должен учитываться в новых разработках во избежание повторения ошибок. Требования к надежности на этапе конструирования формулируются в результате применения целенаправленных процедур и анализов и устанавливаются в графической и текстовой форме в конструкторской документации: в технических требованиях и на поле чертежа, а также в технических условиях. Исполнение этих требований в конечном итоге направлено на безусловное выполнение изделием своих функциональных задач и обеспечение заданной надежности. **Результаты.** Рассмотренные в статье аспекты позволяют разграничить методы теории надежности, которые базируются на вероятностно-статистических моделях, с практическими инженерными методами, нацеленными на создание надежной техники. Область теории надежности распространяется на исследование поведения готовых изделий, исходя из наличия информации о математических моделях, учитывающих стохастичность параметров. Реальные объекты в теории надежности схематизируются до моделей, которые описываются вероятностными зависимостями и имеют выборку, пригодную для статистических обобщений. На практике же, как правило, инженеры работают в условиях отсутствия статистики и представлений о вероятностном поведении будущего изделия, причем арсенал методов и алгоритмов его работы, по сути, позволяет в широком диапазоне влиять на надежность реальных изделий. **Выводы.** В статье показано, что стадии жизненного цикла уникальных высокоответственных систем, предшествующих этапу эксплуатации, резко дифференцированы по действенности мер обеспечения надежности. На каждой стадии необходимо пользоваться определенными, свойственными только данной стадии алгоритмами и методами надежности, что способно существенно повысить эффективность решения задач надежности уникальных высокоответственных систем.

Ключевые слова: уникальные высокоответственные системы, трансформируемая конструкция, космический аппарат, надежность, генезис, жизненный цикл изделий.

Формат цитирования: Похабов Ю.П., Валишевский О.К. Генезис надежности уникальных высокоответственных систем // Надежность. 2016. №3. С. 47-53. DOI: 10.21683/1729-2646-2016-16-3-47-53.

Введение

При создании любого технического изделия в первую очередь решается задача достигнуть таких выходных характеристик, которые оно только способно продемонстрировать. Однако сама по себе

достижимость таких характеристик не гарантирует того, что изделия будут изготавливаться от раза к разу годными, не перестанут нормально функционировать после хранения и транспортирования, выполнят свои целевые задачи в полном объеме или не отработают меньше заданного срока.

Неизбежные изменения возможных состояний изделий под воздействием внешних условий и внутренних химико-физических процессов способны со временем существенным образом снизить их выходные характеристики, в результате чего ожидаемая эффективность изделий может оказаться не достигнутой.

Почему такое возможно? Чаще всего недооцениваются, либо должным образом не учитываются режимы и условия функционирования изделий. Нередки непреднамеренные ошибочные действия персонала в процессе производства и эксплуатации. Иногда конструктивные решения опережают технологические возможности производства или неадекватны представлениям о физических процессах, происходящих при работе изделий. В любом из случаев указанные предпосылки могут привести к возникновению отказов, которые способны обернуться авариями и катастрофами. Если социально-экономические потери, которые общество готово понести в случае отказов изделий, превышают допустимый критический уровень, то возникает необходимость в решении задач по обеспечению их надежности.

Для обычной техники обеспечение надежности принято считать вторичной задачей, которая решается чаще всего «между прочим», поскольку отказы, как правило, не имеют серьезных последствий. Вопросы надежности в этом случае рассматриваются в контексте оптимизации финансовых и имиджевых издержек. Однако существуют технические объекты, которые не допускают отказов, несмотря на неизбежные дополнительные финансовые затраты по их профилактике, ведь в противном случае это может привести к более существенным потерям в результате аварий. Пример таких объектов – уникальные высокоответственные системы (УВС), для которых в некоторых случаях сама возможность отказов способна поставить под сомнение целесообразность их создания. Здесь важно разобраться, на какой из стадий жизненного цикла УВС меры по обеспечению надежности максимально действенны, а когда уже поздно что-либо предпринимать.

В связи с этим имеет смысл рассмотреть генезис надежности УВС на примере трансформируемых конструкций (ТК), основная задача которых за счет одноразового срабатывания на орбите обеспечить условия для длительного функционирования космического аппарата (КА) в условиях космического пространства [1].

Что происходит с надежностью на этапе эксплуатации трансформируемых конструкций

Согласно ГОСТ 25866-83 эксплуатация изделий в общем случае включает в себя использование по назначению, транспортирование, хранение, техническое обслуживание и ремонт. Для раскрывающихся частей ТК процесс эксплуатации условно можно ограничить рамками, начиная с момента передачи изделия на хранение после заводской приемки и заканчивая раскрытием

в рабочую конфигурацию на околоземной орбите. В процессе эксплуатации ТК последовательно проходят следующие стадии жизненного цикла: хранение, наземное транспортирование, техническое обслуживание, подготовку на полигоне к запуску, полет в составе ракеты-носителя, выведение на орбиту, подготовку к раскрытию и раскрытие в рабочую конфигурацию [2].

Предположим, что при эксплуатации в какой-либо момент времени t ТК может внезапно отказать и восстановить или отремонтировать ее в последующие моменты времени невозможно. Определим вероятность $P_f(t)$, с которой такая конструкция будет функционировать в пределах периода эксплуатации вплоть до момента наступления времени t . Если представить работоспособность ТК как выборку последовательных независимых испытаний с вероятностями $P_v(\tau)$, то вероятность ее функционирования в период времени t будет равна:

$$P_f(t) = \prod_{\tau=1}^t P_v(\tau). \quad (1)$$

Из (1) следует, что с течением времени t вероятность функционирования ТК не может повышаться, она может снижаться, либо теоретически оставаться постоянной на уровне 1.

Снижение $P_f(t)$ является результатом стохастических изменений состояния ТК при воздействии внешних факторов (перегрузок, ударов, сотрясений, вибраций, колебаний температур, влажности, агрессивных сред и проч.), вследствие реализации следующих процессов:

- деградации физико-механических свойств материалов из-за износа, коррозии, старения, охрупчивания и т.д.;
- изменений физико-механических характеристик материалов при воздействии знакопеременных температур;
- необратимых деформаций и разрушений (пластических деформаций, смятия контактных поверхностей, ползучести, трещин и т.д.);
- ухудшения характеристик трибосопряжений;
- проявления конструктивных нестабильностей в виде смещений фиксированных деталей, самоотвинчивания резьбовых соединений, изменений люфтов в подвижных узлах, нарушений регулировки механизмов и т.п.

Следующим немаловажным аспектом является решение вопроса об исходном уровне величины P_0 в момент времени, который соответствует началу эксплуатации.

Рассмотрим ситуацию на момент времени, когда ТК находится в состоянии ожидания эксплуатации, т.е. ей уже в полной мере присуща способность проявлять свойства надежности, поскольку взаимоположение, взаимосвязь и взаимодействие элементов внутри ТК уже осуществлено (ТК готова к эксплуатации), а взаимоположение, взаимосвязь и взаимодействие ТК в окружающей среде и с другими объектами предусмотрено и предполагается. Указанное состояние ТК априори задано в конструкторской документации (КД) в виде номинальных

значений параметров μ_i и соответствующих допусков $\Delta\mu_i$. Причем сами параметры являются случайными величинами (зависящими или не зависящими от времени), которые могут изменяться в пределах не случайных границ поля допусков:

$$\Delta\mu_i = \mu_{i\max} - \mu_{i\min} \quad \forall i = (\overline{1, n}). \quad (2)$$

Совокупность параметров μ_i составляет множество:

$$\mu_i \in R^N. \quad (3)$$

Число уравнений N множества (3) соответствует числу параметров конструкции и с ростом ее детализации может увеличиваться, причем сами параметры, согласно (2) всегда будут находиться в заданном диапазоне:

$$\mu_{i\min} \leq \mu_i \leq \mu_{i\max}. \quad (4)$$

Если КД доработана настолько, что в ней отсутствуют грубые ошибки, требующие проведения изменений КД в процессе производства, то она является стационарной стохастической моделью объекта, представленной в чертежно-текстовом виде [3]. Если случайная величина любого параметра $\mu_i(t)$, предусмотренного в стационарной модели ТК, при изготовлении укладывается в допуск $\Delta\mu_i$, то ТК считается годной для эксплуатации. Таким образом, готовность объекта к эксплуатации определяется выполнением всех требований КД по соблюдению установленных параметров μ_i , а ее работоспособность определяется случайностью их попадания в заданные допусками пределы (4). Выход параметров μ_i за пределы допусков квалифицируется как отказ. Кроме того, возможность наступления отказов заложена в самом принципе использования стационарной стохастической модели объекта. Поскольку число уравнений (3) при разработке КД всегда конечно при бесконечном числе случайных величин, то существует риск не учета каких-либо факторов отказа.

Таким образом, до начала эксплуатации всегда существует риск с вероятностью γ , что не все параметры μ_i при конструировании будут должным образом учтены, а те параметры, которые заданы в КД, будут находиться при эксплуатации в соответствующем допуске $\Delta\mu_i$.

Предположим, что все параметры ТК независимы в смысле надежности, а не учет какого-либо из параметров или выход за пределы допусков любого параметра приведет к его отказу. Событие, характеризующее переход в состояние готовности к функционированию ТК без отказа, обозначим H , а событие, характеризующее наступление отказа в случае реализации риска с вероятностью γ , обозначим A , тогда:

$$\begin{aligned} P(H)+P(A)=1, \quad P(A)=\gamma, \\ P(H)=1-\gamma. \end{aligned} \quad (5)$$

Из формулы (5) следует, что исходная надежность ТК до начала эксплуатации $P_0=P(H)$ всегда меньше единицы. Причем, после функционирования ТК в те-

чение времени t , ее надежность с учетом формул (1) и (5) равна:

$$P(t)=P_f(t) \cdot P(H) \quad (6)$$

Формула (6) позволяет рассматривать надежность ТК не только как результат выполнения ее функций без учета генезиса своего происхождения, но и как результат процесса, вследствие которого она непосредственно возникает. Таким образом, заданное в техническом задании (ТЗ) на разработку значение показателя безотказности ТК должно определяться формулой (6), которая подразумевает учет не только условий эксплуатации, но также конструкторских и производственных предпосылок к отказам вследствие следующих факторов:

- несовершенство методов проектирования и конструирования, конструкторских ошибок, нарушений требований нормативно-технической документации, нарушений норм и правил конструирования;
- несовершенство и ошибок применяемых технологий;
- дефектов и ошибок изготовления, сборки и монтажа, нарушений технологических процессов изготовления, приработки узлов трения и сборки, ухудшения параметров в результате испытаний, предусмотренных производственным циклом.

Мало того, если при условии перехода в состояние готовности к функционированию без отказа, обозначенном как событие H , нормальное выполнение функций ТК при раскрытии обозначить как событие B , то надежность (6) функционирования ТК в течение времени t следует интерпретировать как условную вероятность:

$$P(t)=P(B|H).$$

Исходя из сказанного, надежность следует рассматривать и оценивать не только на стадиях жизненного цикла изделия, готового к эксплуатации, но и в тех случаях, когда оно создается в процессе производства или существует в виде моделей, таких как:

- информационные модели при проектировании;
- графические модели при конструировании;
- модели технологического процесса при подготовке производства.

По мере осуществления последовательного моделирования и производства изделия в течение жизненного цикла, его ожидаемая исходная надежность на начало эксплуатации имеет тенденцию к снижению из-за неизбежности накопления предпосылок к отказам как вследствие ошибок моделирования, так и вследствие возникновения различного рода отклонений при производстве.

Справедливость формулы (6) подтверждается результатами исследований, проведенных Rome Air Development Center с целью совершенствования стандарта по обеспечению надежности Министерства обороны США MIL-HDBK-217 [4]. Анализ подвергались сведения об авариях и инцидентах на 300 американских и европейских КА, касающиеся 2500 фактов отказов за период с начала 1960-х годов по январь 1984 года. В качестве причин отказов ТК были признаны следующие факторы: ошибки конструирования – 34,4%, недооценка

условий внешней среды – 25,3%, дефекты комплектующих – 10,8%, качество изготовления – 8,9%, условия эксплуатации – 6,9%, другие – 2,2% и неизвестные – 11,5%. Фактически, не менее чем в 79,4% случаев, отказы ТК были предопределены еще до начала их эксплуатации – «за кульманом» и в производственных цехах (что-то недодумали, не учли, где-то ошиблись, допустили брак, не проконтролировали т.д.).

Таким образом, ожидаемая безотказность ТК на начало эксплуатации в общем случае всегда меньше единицы и в течение эксплуатации имеет тенденцию к снижению. Мало того, конструкторско-технологические и производственные причины, которые предопределяют отказы еще до начала эксплуатации, превалируют над причинами отказов, возникающими вследствие факторов, воздействующих при эксплуатации.

Запись формул (1) и (5) не противоречит тому, чтобы безотказность ТК в интервале времени эксплуатации от 0 до t была «близкой к единице» – фактически «ноль и девять в периоде»: $0, (9) \cong 1$. Если предположить, что при проектировании, конструировании, технологической подготовке и производстве не допущено ни единой ошибки (т.е. нет причин для отказов), то, гипотетически, исходная надежность объекта на начало эксплуатации может быть предельно возможной, что не противоречит идеи создания безотказных объектов.

Что происходит с надежностью до начала эксплуатации трансформируемых конструкций

Разработка и постановка продукции на производство согласно ГОСТ Р 15.201-2000 укрупненно включает следующие стадии:

- 1) Разработку тактико-технического задания на опытно-конструкторскую работу (ОКР);
- 2) Проведение ОКР (в т.ч. разработку КД и технологической документации (ТД) согласно ГОСТ 2.103-68 и ГОСТ 3.1102-81, соответственно);
- 3) Постановку на производство (в т.ч. подготовку и освоение производства, изготовление продукции и проведение квалификационных испытаний).

На стадиях разработки и постановки продукции на производство с позиций генезиса надежности имеет смысл рассмотреть следующие стадии жизненного цикла продукции:

- разработка ТЗ – установление требований к выпускаемой продукции;
- проектирование (техническое предложение, эскизный проект, технический проект) – увязка и обоснование требований к продукции;
- разработка КД – реализация требований к продукции в технической документации для ее изготовления;
- разработка ТД – увязка и согласование требований КД с возможностями производства;
- производство (постановка продукции на производство) – выпуск готовой продукции.

Как отмечалось в [5], надежность на стадии разработки и постановки продукции на производство проявляется как способность. В соответствие с этим тезисом, на момент начала разработки ТЗ способность будущего изделия проявлять надежность отсутствует. Если употребить термин «условной вероятности безотказной работы» изделия, то она равна нулю (нет еще ничего, не о чем говорить). При разработке ТЗ формируются требования к условиям и режимам эксплуатации будущего изделия, в которых ему, собственно, предстоит проявить свойство надежности. К этому времени должны быть получены и накоплены сведения об условиях внешних воздействий и нагрузок, выполнены фундаментальные исследования по изучению характеристик конструкционных материалов, отработаны ключевые технологии производства. При наличии достоверных статистических выборок существует возможность уйти от стохастической зависимости изменения параметров изделия, переводя решение задач надежности к детерминированному подходу. Наиболее известным примером такого рода является обеспечение прочности конструкций с использованием коэффициентов безопасности и запасов прочности. Чем более обоснованы и точнее будут сформулированы такие требования в ТЗ, тем выше условная вероятность безотказной работы будущего изделия.

Исходя из требований ТЗ в процессе проектирования (термин «проектирование» используется здесь согласно ГОСТ 22487-77, статья 1), закладываются принципы работы будущего изделия, детализируются технические решения, оптимизируются характеристики изделия и алгоритмы его функционирования, уточняются расчетные схемы и методы исчисления параметров и т.д.

Этап проектирования является наиболее важным для обеспечения надежности будущего изделия, поскольку здесь существует возможность принятия таких технических решений, которые позволяют выбрать рациональные конструктивно-компоновочные и конструктивно-силовые схемы, и способны резко снизить неопределенности состояний изделий, тем самым повысить его надежность. Например, использование тепловых развязок в узлах крепления протяженных континуальных конструкций приводит к исключению возможности заклинивания (перекашивания) исполнительных элементов замков системы зачекочки в нестационарном поле знакопеременных температур [6]. Другим примером, подобного рода может служить перенос сварного шва в лейнере металлокомпозитного сосуда высокого давления из зоны максимальных напряжений, что приводит к снижению влияния технологических дефектов в сварных швах (в частности, за счет образования окисных плен на поверхности свариваемых деталей), соответственно, к повышению и стабилизации значений запасов прочности [7].

Способность будущего изделия проявлять надежность изменяется и на стадии разработки КД, но возможности прироста условной вероятности безотказной

работы ограничены (разработка КД производится на основе уже принятых при проектировании технических решений, причем исправить проектные ошибки при конструировании сложно). Резервы повышения надежности связаны с возможностями исправления и подчистки конструктивных «мелочей», допущенных за счет невнимательности, неправильного выбора параметров и решений, некомпетентности, привычки работать на «авось», недостаточной квалифицированности проектировщиков и т.д. [8]. Главным результатом конструирования являются ясные и четкие требования к изготовлению изделий, исключающие любые недосказанности, двоякости понимания и интерпретации. К моменту завершения разработки КД условная вероятность безотказной работы изделия достигает предельно возможного уровня для данной разработки (подразумевается, что разработчик вложил все свои знания, умения и навыки, т.е. на большее он уже не способен).

Надежность будущих изделий напрямую зависит от качества принимаемых решений в процессе разработки, которые напрямую зависят от принципов, правил и требований, используемых при проектировании и конструировании. Причем указанные понятия взаимосвязаны и несут конкретную смысловую нагрузку.

Принцип – это основополагающая истина, не требующая доказательств, которая следует из установленных закономерностей и формирует общую стратегию действий. Принципы используются для выработки проектных решений, как *«промежуточных или конечных описаний объекта проектирования, необходимых и достаточных для рассмотрения и определения дальнейшего направления или окончания проектирования»* [ГОСТ 22487-77, статья 7]. Число принципов ограничено основополагающими факторами, каждый из которых выражает физическую сущность того или иного явления, влияющего на надежность. Сущность этих явлений объективна и незыблема, например, число функциональных элементов должно быть минимальным, изделие в процессе эксплуатации не должно разрушаться, энергии приводов должно быть достаточно для осуществления предписанных перемещений и т.д. Принцип – это теоретическая основа дальнейших рассуждений, решений или действий, в нем не содержится конкретных указаний на способы осуществления, просто это должно быть так, а не иначе. Для реализации принципов используются правила, которые вытекают из принципов, ими определяется и конкретизируется применение принципов.

Правило – это закономерность, служащая руководством в чем-либо, которая основана на устойчивой взаимосвязи между явлениями, установленном порядке или нормах деятельности. Принципы и правила существуют объективно, независимо от нас, отступление от них нарушает порядок вещей.

Рассмотрим пример, дающий представление о том, чем отличаются принципы от правил. Обеспечение энергоизбыточности приводов раскрытия ТК – это принцип работоспособности поворотной конструкции в условиях

неопределенностей внешних условий, а также разбросов физических свойств материалов и технологических допусков деталей и сборочных единиц конструкций. Значения величины энергоизбыточности определяются правилами по выбору соотношения моментов движущих сил и моментов сил сопротивления в поворотном узле для конкретных типов приводов, которые учитывают действующие сопротивления, инерционность раскрывающихся конструкций, комбинацию наихудших факторов и т.п. [9]. Принцип указывает, как должно быть (необходимо обеспечить энергоизбыточность), а правило уточняет, как именно это должно быть осуществлено (например, отношение запаса движущего момента к моменту сил сопротивления в шарнире должно быть не менее трех для худшего сочетания факторов, отношение запаса движущего момента должно быть обеспечено в любом угловом положении шарнира и т.д.).

Построить правила без принципов нельзя. Правила используются для выработки проектных и конструкторских решений.

Правила являются переходным звеном от теории к практике, поэтому они часто являются концентрированным опытом, который должен учитываться в новых разработках во избежание повторения ошибок. Этот опыт может применяться в форме установки «так еще деды делали», либо в явном виде отражаться в положениях нормативно-технической документации. К сожалению, проследить, насколько оправданно и действительно используются правила, крайне сложно, для этого они должны быть по меньшей мере формализованы и записаны, как, например, в работе [10], к тому же для новых разработок правил еще не существует по определению. С позиций обеспечения надежности, следование правилам является необходимым, но не достаточным условием.

Надежность не может быть достигнута «по умолчанию», она может быть обеспечена только в результате неукоснительного исполнения требований, направленных на стабильность проявления заданных свойств объектов. Основой обеспечения надежности является выполнение требований, как осознанной необходимости соблюдения условий, которые должны быть строго исполнены на производстве. Требование – потребность или ожидание, которое установлено, обычно предполагается или является обязательным [ГОСТ ISO 9000-2011, статья 3.1.2].

Требования к надежности на этапе конструирования могут быть сформулированы в результате применения целенаправленных процедур и анализов [11] и устанавливаются в графической и текстовой форме в КД: в технических требованиях и на поле чертежа, а также в технических условиях. Их исполнение в конечном итоге направлено на безусловное выполнение изделием своих функциональных задач. Однако исполнение требований КД в процессе постановки продукции на производство не способно повысить условную вероятность безотказной работы изделия в силу того, что перед производителями таких целей никто не ставит. При

этом возникает достаточно поводов и причин отступить от требований КД при изготовлении, нарушить технологические процессы и технологическую дисциплину, недостаточно или неэффективно использовать средства и методы неразрушающего контроля на производстве и т.п., что неизбежно приводит к дефектам и браку.

Задача на стадии выпуска готовой продукции – «не навредить» качеству и надежности при воплощении чертежно-текстовой модели в готовое изделие, при этом максимальная задача – чтобы конструктор, технолог и производитель были «на одной волне». Для этого необходимо, чтобы требования в КД были без искажений и интерпретаций отображены в ТД, а на производстве исполнены с допустимыми отклонениями [12]. На этапе разработки ТД и постановки продукции на производство, условная вероятность безотказной работы будущего изделия естественным образом снижается до значений исходного уровня надежности P_0 на начало эксплуатации.

Изменение надежности трансформируемых конструкций на стадиях жизненного цикла

Если на основании (6) исходить из того, что причины отказов возникают, существуют и развиваются, начиная уже с самых ранних стадий жизненного цикла ТК, то условная вероятность отказов может быть представлена графиком, приведенным на рисунке.

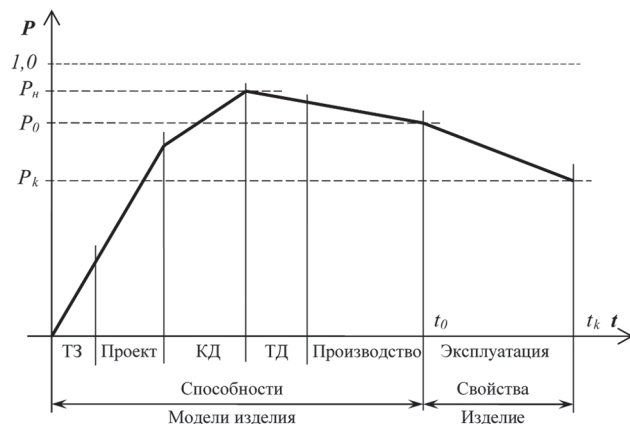


Рис. График изменения вероятности безотказной работы (условной вероятности) УВС по стадиям жизненного цикла

График показывает, что на конец эксплуатации ТК t_k его надежность P_k имеет минимальное значение, определяемое (1). Считается, что изделие обеспечивает заданную надежность $P_{зад}$ если выполняется неравенство:

$$P_k > P_{зад}$$

Падение надежности изделия в интервале времени от t_0 до t_k согласуется с представлением о поведении изделий, исходя из широко известной «корытообразной кривой» надежности изделия в течение срока службы [13]. Указан-

ная кривая характеризует изменение вероятности отказов при эксплуатации. Считается, что в начальный период эксплуатации вероятность поломки высока из-за принципиальных ошибок, допускаемых при проектировании, дефектов изготовления или неправильной сборки изделий. Затем наступает период накопления износа изделия, в течение которого вероятность отказа сравнительно не велика. После того, как износ достигает определенного уровня, отказы вновь резко возрастают.

Для ТК не предусматривается длительная наработка на отказ и связанные с этим процессы деградации и износа, как представляется классической «корытообразной кривой», поскольку их эксплуатация осуществляется кратковременно в течение периода раскрытия механизмов КА при подготовке его к работе. Процесс эксплуатации ТК полностью вписывается только в первый участок «корытообразной кривой». Однако, поскольку ТК относятся к УВС, характеризующихся малой вероятностью отказов, то отказы на этапе эксплуатации должны быть минимальными, т.е. к началу эксплуатации вероятности отказов из-за проектно-конструкторских и производственных ошибок должны быть исключены, или минимизированы.

Согласно (6), к началу эксплуатации исходная надежность P_0 всегда ниже единицы, при этом до момента времени t_0 изделие характеризуется способностью проявлять свойство надежности, а после – характеризуется самим свойством надежности. Разделение понятия надежности как способности и как свойства позволяет рассматривать по отдельности задачи практической инженерии, нацеленные на получение функционального и надежного изделия, и задачи надежности в классической постановке теории надежности.

Как следует из рисунка, способность изделия проявлять свойство надежности при переходах со стадии на стадию жизненного цикла существенно меняется. Переход со стадии на стадию жизненного цикла в разной степени сказывается на исходном уровне надежности к началу эксплуатации. Представленный график наглядно иллюстрирует задачи, стоящие на различных стадиях жизненного цикла при разработке и производстве ТК:

- при разработке ТЗ – закончить фундаментальные исследования по изучению характеристик конструкционных материалов и получить все необходимые сведения об условиях внешних воздействий и нагрузок;
- при проектировании – обеспечить максимально возможный уровень надежности за счет использования эффективных технических решений;
- при выпуске КД – как минимум, не допустить потери надежности, достигнутой при проектировании, и как максимум, повысить надежность за счет исправления ошибок проекта и установления ясных и четких требований к изготовлению ТК;
- при выпуске ТД – не исказить требования к надежности в КД;
- при производстве – не допустить отступлений от требований КД и ТД.

Заключение

Рассмотренные в статье аспекты, связанные с генезисом надежности УВС, позволяют разграничить методы теории надежности, которые базируются на вероятностно-статистических моделях, с практически инженерными методами, нацеленными на создание надежной техники. Область теории надежности распространяется на исследование поведения готовых изделий, исходя из наличия информации о математических моделях, учитывающих стохастичность параметров. Реальные объекты в теории надежности схематизируются до моделей, которые описываются вероятностными зависимостями и имеют выборку, пригодную для статистических обобщений. Но на практике, как правило, инженеры работают в условиях отсутствия статистики и представлений о вероятностном поведении будущего изделия, однако, арсенал методов и алгоритмов его работы, по сути, позволяет в широком диапазоне влиять на надежность реальных изделий.

В статье на примере ТК показано, что стадии жизненного цикла УВС резко дифференцированы по действенности мер обеспечения надежности. На каждой стадии необходимо пользоваться определенными, свойственными только данной стадии алгоритмами и методами надежности, что способно существенно повысить эффективность решения задач надежности УВС.

Библиографический список

1. Похабов Ю.П. Подход к обеспечению надежности уникальных высокоответственных систем на примере крупногабаритных трансформируемых конструкций // Надежность. – 2016. – № 1.- С. 24-36.
2. Чеботарев В.Е., Косенко В.Е. Основы проектирования космических аппаратов информационного обеспечения. – Красноярск, СибГАУ, 2011. – 488 с.
3. Куриленко А.М., Ледовский А.Д. Качество судовых динамических систем правления. – СПб.: Судостроение, 1994. – 176 с.
4. Hecht H., Hecht M. Reliability prediction for spacecraft, Report prepared for Rome Air Development Center, no. RADC-TR-85-229, Dec. 1985. – 156 p.
5. Похабов Ю.П. О философическом аспекте надежности на примерах уникальных высокоответственных систем // Надежность. – 2015. – № 3. – С. 16-27.

6. Способ закрепления изделий: пат. 2230945 Рос. Федерации. МПК F16B 1/00 / Ю.П. Похабов, В.В. Гриневич. – № 2002113143/11; заявл. 18.05.2002; опубл. 20.06.2004. Бюл. № 17.

7. Лепихин А.М., Москвичев В.В., Черняев А.П., Похабов Ю. П., Халиманович В. И. Экспериментальная оценка прочности и герметичности металлокомпозитных сосудов высокого давления // Деформация и разрушение материалов. – 2015. – № 6. – С. 30-36.

8. Бушуев В.В. Практика конструирования машин: справочник. – М.: Машиностроение, 2006. – 448 с.

9. Способ выбора привода для поворота конструкции в шарнирном узле: пат. 2198387 Рос. Федерации. МПК G 01L 3/00 5/00 / Ю.П. Похабов. – № 2000129330/28; заявл. 23.11.2000; опубл. 10.02.2003. Бюл. № 4.

10. Bowden M.L. Deployment devices // Space Vehicle Mechanisms – Elements of Successful Design, Edited by Peter L. Conley. John Wiley & Sons, Inc., 1998. – P. 495-542.

11. Похабов Ю.П. О методе конструкторско-технологического анализа надежности // Решетневские чтения. – 2015. – Т. 1. – № 19. – С. 126-128.

12. Похабов Ю.П. Обеспечение надежности крупногабаритных трансформируемых механических систем // Решетневские чтения. – 2014. – Т. 1. – № 18. – С. 95-97.

13. Клиффорд М. Справочник инженера. Инженерная механика. М.: Изд-во АСВ, 2003. 280 с.

Сведения об авторах

Юрий П. Похабов, кандидат технических наук, начальник центра научно-технических разработок, Открытое акционерное общество «НПО ПМ – Малое Конструкторское Бюро» (ОАО «НПО ПМ МКБ»), тел.: +7 913 593 43 89, e-mail: pokhabov_yury@mail.ru

662972, Россия, Красноярский край, ЗАТО Железногорск, г. Железногорск, ул. Ленина, 55а

Олег К. Валишевский, ведущий инженер лаборатории трансформируемых конструкций, Акционерное общество «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнёва (АО «ИСС»), тел.: +7 913 582 21 41, e-mail: valishevsky@iss-reshetnev.ru

662972, Россия, Красноярский край, ЗАТО Железногорск, г. Железногорск, ул. Ленина, 52

Поступила 17.03.2016