

Обеспечение надежности уникальных высокоответственных систем

Юрий П. Похабов, Открытое акционерное общество «НПО ПМ – Малое Конструкторское Бюро», Россия, Красноярский край, Железногорск

Резюме. Цель. Обычно надежность изделий исследуется без учета закономерностей ее генезиса, а причины ненадежности принято рассматривать в виде обобщающих вероятностно-статистических зависимостей, учитывающих «результат взаимодействия ряда факторов: внешней среды, свойств системы, технологических, эксплуатационных и т.п. требований». Как следствие, при оценке показателей надежности исходят из предположения, что к началу эксплуатации изделие находится в работоспособном состоянии. Соответственно зависимости надежности от времени рассматриваются только за период эксплуатации изделий. Наиболее известная зависимость надежности от времени – это эмпирическая функция отказов, так называемая U-образная кривая надежности, описать которую простыми математическими формулами, пригодными для инженерных расчетов, пока никому не удалось. Наличие первого «горба» на U-образной кривой связывают с проявлением ошибок, допускаемых при проектировании, дефектов изготовления или неправильной сборки изделий, однако же, конкретные причины появления этого «горба» в публикациях не раскрываются. Определение термина «работоспособность» не исключает возможностей, а на практике нередки случаи, когда при проектировании и конструировании оказываются учтенными не все параметры, характеризующие способность изделия выполнять заданные функции, или какие-либо из требований документации не согласованы со значениями функциональных параметров, а при изготовлении значения этих параметров могут выйти за установленные пределы. В результате, на первый взгляд, работоспособная, причем даже прошедшая квалификацию по результатам экспериментальной отработки, конструкция может не соответствовать заданной надежности. **Методы.** Свойства надежности любого изделия закладываются задолго до начала эксплуатации, и получают способность проявиться в полной мере только с ее началом. В статье приведен график, отражающий условную вероятность безотказной работы по стадиям жизненного цикла изделий задолго до начала эксплуатации. Обеспечение надежности уникальных высокоответственных систем (УВС) может осуществляться уже с самых ранних стадий жизненного цикла на основе последовательного выполнения определенных конструкторских, технологических и производственных процедур и применения методов конструкторско-технологического анализа надежности. **Результаты.** Рассмотрены роль и смысл каждой из стадий жизненного цикла в обеспечении надежности УВС. Перечислены процедуры конструкторско-технологического метода обеспечения надежности и приведены принципы конструирования УВС. Даны базовые инструменты повышения и принципы оценки надежности. **Выводы.** В статье показаны возможности обеспечения надежности УВС с помощью конструкторско-технологических процедур, применяемых на каждой из стадий жизненного цикла до начала эксплуатации. Применение таких процедур способно на единой теоретической и методологической основе поднять на соответствующий уровень технологию проектирования, конструирования, подготовки производства, изготовления и на этой же основе создать методику оценки надежности УВС.

Ключевые слова: уникальная высокоответственная система, обеспечение надежности, анализ надежности, оценка надежности, стадии жизненного цикла, проектирование, конструирование.

Формат цитирования: Похабов Ю.П. Обеспечение надежности уникальных высокоответственных систем // Надежность. 2017. Т. 17, № 3. С. 17-23. DOI: 10.21683/1729-2646-2017-17-3-17-23.

Введение

Обычно надежность изделий исследуется без учета закономерностей ее генезиса, а причины ненадежности принято рассматривать в виде обобщающих вероятностно-статистических зависимостей, учитывающих «результат взаимодействия ряда факторов: внешней среды, свойств системы, технологических, эксплуатационных и т.п. требований» [1]. Как след-

ствие, при оценке показателей надежности исходят из предположения, что к началу эксплуатации (моменту начала исчисления наработки) изделие находится в работоспособном состоянии [2] и если t – общая наработка, а τ – наработка изделия до первого отказа, то вероятность безотказной работы (ВБР) изделия за время t определяется как:

$$P(t)=P(\tau>t). \quad (1)$$

Соответственно зависимости надежности от времени рассматриваются только за период эксплуатации изделий. Наиболее известная зависимость надежности от времени – это эмпирическая функция отказов, так называемая *U*-образная кривая надежности [3], описать которую простыми математическими формулами, пригодными для инженерных расчетов, пока никому не удалось. Наличие первого «горба» на *U*-образной кривой связывают с проявлением ошибок, допускаемых при проектировании, дефектов изготовления или неправильной сборки изделий, однако же, конкретные причины появления этого «горба» в публикациях не раскрываются [4].

В этой связи уместно вспомнить шутливое высказывание, которое приводит И.А. Ушаков в своей неформальной истории теории надежности: «Считают надежность те, кто ее не умеет делать» [5]. Действительно, в теоретическом аспекте надежность любой сложной технической системы представляет собой многомерную задачу, для постановки и решения которой необходимо учитывать множество взаимозависимых параметров, имеющих стохастическую природу, что практически неосуществимо. В то же время инженеры научились достигать на практике более или менее приемлемый уровень безотказности сложной техники, пользуясь качественными критериями надежности [6]. Например, разработчикам раскрывающихся конструкций космических аппаратов хорошо известно, что проектируемое изделие должно быть, во-первых, прочным, чтобы не сломаться до или в процессе раскрытия, во-вторых, работоспособным, чтобы конструктивное исполнение позволяло осуществлять процесс раскрытия после воздействия полетных нагрузок, и, в-третьих, надежным, чтобы обеспечить стабильность раскрытия от раза к разу в заданных режимах и условиях эксплуатации.

Как известно, работоспособность – это *состояние объекта, при котором значения всех параметров, характеризующих способность выполнять заданные функции, соответствуют требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации* [7]. Очевидно, что само определение термина «работоспособность» не исключает возможностей, а на практике нередко случаи, когда при проектировании и конструировании оказываются учтенными не все параметры, характеризующие способность изделия выполнять заданные функции, или какие-либо из требований документации не согласованы со значениями функциональных параметров, а при изготовлении значения этих параметров могут выйти за установленные пределы. В результате, на первый взгляд, работоспособная, причем даже прошедшая квалификацию по результатам экспериментальной отработки, конструкция может не соответствовать заданной надежности. Характерный пример – это повторяющееся не раскрытие панелей солнечной батареи на космических кораблях Союз ТМА-14М (2014 г.) и Союз ТМА-17М (2015 г.) из-за заклинивания элементов крепления батарей.

Роль стадий жизненного цикла, предшествующих эксплуатации, в обеспечении надежности уникальных высокоответственных систем

В работах [8–10] показано, что создание УВС с позиций обеспечения заданной надежности без учета закономерностей ее генезиса невозможно. Свойства надежности любого изделия закладываются задолго до начала эксплуатации, и получают способность проявиться в полной мере только с ее началом.

Из практики известно, что, находясь в состоянии ожидания эксплуатации, любые объекты несут в себе риски γ возникновения отказов из-за конструкторских, технологических и производственных ошибок, которые могут достигать 80% [10–11]. При этом до 80–85% затрат в машиностроении предопределяются техническими решениями, которые формируются в процессе конструирования и разработки технологии [12].

В работе [10] рассмотрено влияние конструкторской и технологической подготовки производства на надежность, в результате чего предложено оценивать ВБР УВС (1) в виде:

$$P(t) = (1 - \gamma) \cdot P(\tau > t). \quad (2)$$

Формула (2) призвана фокусировать внимание разработчика на начальных стадиях жизненного цикла (ЖЦ) – проектировании и конструировании, где только и существует возможность принять такие технические решения, которые позволят обеспечить максимально высокую надежность будущего изделия. При дальнейшем продвижении разработки по стадиям ЖЦ таких возможностей больше нет, не говоря уже о том, что «*повысить надежность техники в процессе эксплуатации нельзя*» [6].

В одном из старейших отечественных стандартов – ГОСТ 2.103 – стадии выпуска конструкторской документации (КД) разделены на разработку проектной (ПКД) и рабочей конструкторской документации (РКД), причем стадия ПКД включает три этапа: техническое предложение, эскизный и технический проекты. Каждая из стадий проектирования и конструирования выполняет строго определенные задачи и несет вполне конкретные смыслы, суть которых следует из терминологических определений, приведенных в соответствующих нормативно-технических документах:

1) Проектирование – *процесс составления описания, необходимого для создания в заданных условиях еще не существующего объекта, на основе первичного описания этого объекта и (или) алгоритма его функционирования или алгоритма процесса преобразованием (в ряде случаев неоднократного) первичного описания, оптимизацией заданных характеристик объекта и алгоритма его функционирования или алгоритма процесса, устранением некорректности первичного описания и последовательным представлением (при необходимости) описа-*

ний на различных языках. [13]. Стадия проектирования соответствует разработке технического предложения и (или) эскизного проекта, а ее результатом является ПКД технического предложения согласно ГОСТ 2.118 и (или) эскизного проекта согласно ГОСТ 2.119.

2) Разработка – стадия конструкторской подготовки производства, выполняемая при помощи САД-системы, в ходе которой разрабатывается подробная 3D-модель изделия, а также 3D-модели узлов, агрегатов и основных (базовых) деталей, на базе которых формируются 2D-проекции (чертежи), выполняются уточненные проектировочные расчеты и моделирование. Результаты работ оформляются в виде информационных объектов, помещаемых в интегрированную информационную среду. Согласно ГОСТ 2.120 эта стадия называется техническим проектированием, а ее результат – техническим проектом [14].

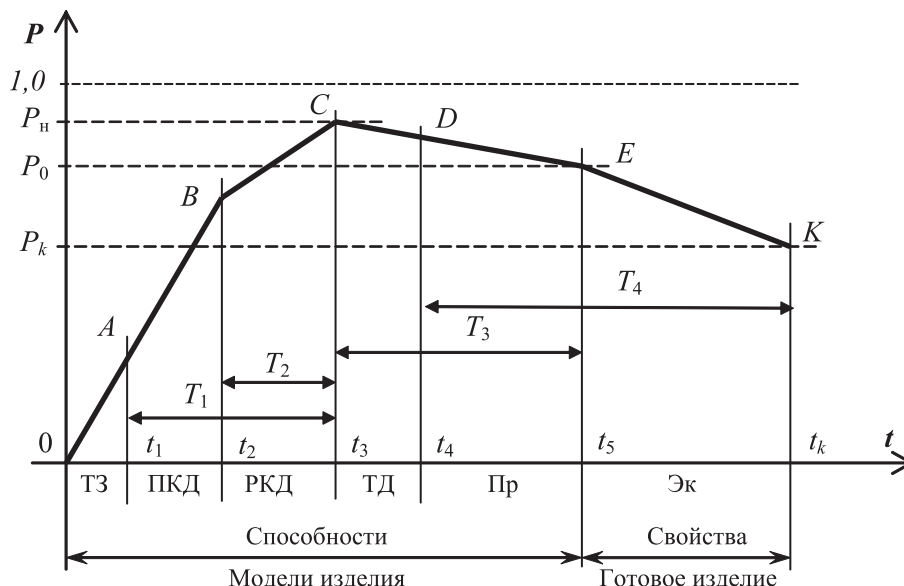
3) Конструирование – стадия конструкторской подготовки производства, выполняемая при помощи САД-системы, в ходе которой создаются 3D-модели всех оригинальных деталей и их 2D-проекции (чертежи), оформляются спецификации и ведомости материалов, комплектующих и нормализованных изделий, выполняются проверочные расчеты и моделирование. Результаты работ оформляются в виде информационных объектов, помещаемых в интегрированную информационную среду. Согласно ГОСТ 2.103 результатом этой стадии является РКД [14].

Современный «менеджерский» подход в решении производственно-технических вопросов основывается на декларативном снижении времени на разработку КД в первую очередь за счет сокращения и даже исключения стадии выпуска ПКД. В результате стадии проектирования и конструирования нередко «сваливаются в общую кучу» и представляются процессом проектирования и

разработки, как совокупностью процессов, переводящих требования в установленные характеристики или спецификации на продукцию, процесс или систему [15]. При этом сам процесс проектирования и разработки делится на этапы: проектирования, как процесса, который преобразует требования в характеристики продукции, излагаемые в проектно-конструкторской документации, и разработки, как процесса создания технической документации на продукцию для последующей подготовки производства и изготовления продукции [16]. В некоторых случаях, из-за «сжатых сроков», а иногда по недомыслию, разработанная таким куцым образом КД передается непосредственно на производство для изготовления изделий, минуя стадию технологической подготовки.

Чем способен обернуться такой «менеджерский» подход для целей достижения заданной надежности УВС, можно увидеть из рисунка, отражающего условную ВБР (УВБР) по стадиям ЖЦ [10].

Рисунок отражает общий (качественный) характер изменения УВБР по стадиям ЖЦ при условии соблюдения требований нормативно-технических документов, общепринятых правил, ЕСКД, ЕСТД и системы менеджмента качества (СМК), например, ИСО 9001. Углы наклона и формы кривой зависимости УВБР от времени в каждом конкретном случае разработки и создания изделий могут несколько отличаться от представленного графика, сохраняя при этом общую тенденцию. Положение точек A, B, C, D и E по оси ординат зависит от надлежащего выполнения процедур по обеспечению надежности, что способно не только в значительной степени нивелировать, но, в случае ненадлежащего выполнения, и существенно усугубить риски возникновения отказов из-за конструкторских, технологических и производственных ошибок.



$0-t_1$ – выпуск тактико-технического и/или технического задания на разработку (ТЗ), t_1-t_2 – проектирование и разработка изделия (ПКД), t_2-t_3 – выпуск рабочих чертежей (РКД), t_3-t_4 – технологическая подготовка производства (ТД), t_4-t_5 – изготовление изделия (Пр), t_5-t_k – эксплуатация готового изделия (Эк)

Рисунок – График изменения УВБР УВС по стадиям ЖЦ

На рисунке отражена важная особенность – здесь зримо разграничены стадии ЖЦ, когда будущее изделие существует в виде моделей и характеризуется способностью проявлять свойство надежности, а когда модель, материализуясь в готовое изделие, проявляет собственно само свойство надежности. Такое разделение позволяет:

- визуализировать скрытые причины возникновения первого «горба» на общеизвестной U -образной кривой надежности;

- получить возможность соотносить величину исходного значения УВБР P_0 к началу эксплуатации с текущими значениями УВБР в процессе разработки УВС, что создает условия для нормирования надежности по стадиям ЖЦ исходя из заданного показателя ВБР на конец эксплуатации P_k .

Смыслы процедур по обеспечению надежности на стадиях жизненного цикла

Положение точек A и B на графике отражает наличие (отсутствие) «грубых» ошибок, связанных со степенью завершенности фундаментальных исследований по изучению характеристик конструкционных материалов, получением достоверных сведений об условиях внешних воздействий и нагрузок (для точки A), рациональностью выбора конструктивно-компоновочных и конструктивно-силовых схем, соблюдением принципов и правил проектирования (для точки B) [10].

При отсутствии «грубых» ошибок в проекте, положение точки B по оси ординат может приближаться к 1, при этом не достигая ее из-за двух групп причин. Одна из группы причин связана с увязками проекта, которые могут продолжаться на протяжении всей стадии проектирования и обычно приводят к недостаточной проработке номенклатуры и содержания требований к изготовлению изделий, которые призваны обеспечить его заданную надежность [9]. Вторая группа причин подробно изложена в работе [12] – это разного рода неизбежные «мелкие» ошибки из-за несовершенств методов проектирования, нарушения предписанных положений нормативно-технической документации, недостаточно высокого уровня квалификации проектантов, их психофизиологических особенностей, связанных с невнимательностью, темпом выполнения работ, общим утомлением и т.п. проявлениями.

Недооценка значения стадии проектирования или ее игнорирование существенно повышает риск недостижения заданного уровня надежности. Если указанные «мелочи» проекта должным образом не будут устранены при конструировании, то положение на графике точки C по оси ординат может не измениться или даже оказаться ниже положения точки B . Задача стадии разработки РКД заключается в повышении надежности УВС за счет исправления ошибок проекта и установления необходимых и достаточных требований к их изготовлению. Положение точки C на графике отражает предельно возможный

уровень надежности P_n для данной разработки, который при реализации последующих стадий ЖЦ способен только снижаться.

Положение точек D и E определяется вероятностью возникновения ошибок при технологической подготовке производства и непосредственном изготовлении изделий. Важную роль здесь играет СМК, которая призвана поднять культуру производства, сократив до приемлемого уровня вероятность производственных ошибок. Важно осознавать, что действующая на производстве СМК не имеет непосредственного отношения к качеству и надежности самого изделия, как конечного продукта, являясь фактически декларацией того, что предприятие способно выпускать продукцию надлежащего качества. Без должного конструкторского и технологического обеспечения сама по себе СМК не способна решить задач надежности, но при этом и без надлежащей СМК задачи надежности решить нельзя.

Положение точки K определяется вероятностью допущения ошибок при эксплуатации изделий. Поскольку согласно ГОСТ 2.102 эксплуатационная документация является одним из видов КД, то указанные ошибки определяются, с одной стороны, установлением ясных и четких требований к исполнению правил эксплуатации, а, с другой стороны, надлежащим их исполнением.

Теоретически для УВС положение точек C , D , E и K по оси ординат может достигать своих предельно возможных значений близких к 1, при условии должного развития и реализации конструкторско-технологических методов анализа и обеспечения надежности [9]. Смыслы деятельности по стадиям ЖЦ согласно рисунку, заключаются в следующем:

- отрезок графика $0-A-B$ – это исключение «грубых» ошибок проекта;
- отрезок графика $B-C$ – исправление «мелких» ошибок проекта;
- отрезок графика $C-D$ – исключение каких-либо ошибок при технологической подготовке производства;
- отрезок графика $D-E$ – недопущение брака при производстве;
- отрезок графика $E-K$ – исключение ошибок при эксплуатации.

Базовый метод обеспечения надежности

Идея метода конструкторско-технологического обеспечения надежности заключается, с одной стороны, в реализации процедур, направленных на установление необходимых и достаточных требований в КД и гарантирующих исполнение этих требований при изготовлении. С другой стороны, в предоставлении в формализованном виде подтверждения выполнения всех конструкторских, технологических и производственных процедур путем проведения соответствующих анализов, при этом анализы надежности рассматриваются как важнейшая и неотъемлемая часть методологии обеспечения надежности УВС.

Конструкторско-технологические анализы и процедуры обеспечения надежности базируются на единой основе – это состояние и качество разработанной КД и технологической документации (ТД), и единых принципах осуществления процедур согласно логической формуле: *сделал→подтверди, что сделал→зафиксируй сделанное*. Единая основа и единые принципы осуществления конструкторско-технологических методов анализа и обеспечения надежности позволяют создать методику, которая может использоваться в трех вариантах своего применения, как дорожная карта при проектировании и конструировании, как средство верификации проекта и разработки, и в качестве инструментария для проведения внешних экспертиз. Применяя, таким образом, конструкторско-технологические методы анализа и обеспечения надежности можно повысить эффективность разработок за счет разделения полномочий и конфликтов интересов между разработчиком, который всегда думает, каким образом система будет работать, и специалистом по надежности, своего рода критичным проверяющим, который должен думать, каким образом система откажется работать [9].

Важно отметить, что конструкторско-технологический анализ надежности (КТАН) направлен на исследование человеческих решений и ошибок (конструкторов, технологов, производственников) при осуществлении последовательных стадий ЖЦ, в то время как широко используемый на западе метод FMEA и его отечественный аналог АВПКО предназначен для исследования функций изделий и процессов. В отличие от методов FMEA, привязка результатов деятельности человека к окончанию каждой из стадий ЖЦ позволяет увязывать методы КТАН и методы проектирования с учетом надежности (DFR) на основе *Stage-Gate* [17].

С позиций процедур обеспечения надежности конструкторско-технологические методы должны применяться совместно с выполнением требований СМК. Для верификации требований к надежности, КТАН должен использоваться с другими методами анализа, проводимыми в строгой последовательности: функциональный анализ (ФА), анализ худшего случая (АХС), собственно сам КТАН и анализ (оценка) надежности (АН) [9], поскольку результаты проведения каждого из предыдущих анализов служат исходными данными для проведения последующих анализов.

Процедуры конструкторско-технологического метода обеспечения надежности

Конструкторско-технологическое обеспечения надежности включает 4 процедуры, показанные на рисунке:

1) Процедура T_1 служит для обоснования нахождения в установленных пределах значений параметров и показателей, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях эксплуатации. Основой процедуры являются инженер-

ные расчеты, проводимые по методикам в наибольшей степени пригодными для этого (расчеты на прочность и жесткость, тепловые расчеты, расчеты размерных цепей и т.п.) любыми приемлемыми методами: детерминированными, полувероятностными или вероятностными [18]. Продолжительность процедуры T_1 включает время выполнения стадий разработки ПКД и РКД. Расчеты производятся итерационно по мере проработки и детализации конструкции, например, начиная с аналитических расчетов на прочность по балочным схемам и заканчивая численными расчетами полноразмерных 3D-моделей методами конечных элементов. Именно эту процедуру при проведении прочностных расчетов стационарных (не реконфигурируемых) конструкций принято считать расчетами на надежность, если они выполняются полувероятностными или вероятностными методами;

2) Процедура T_2 служит для установления требований в КД, выполнение которых при изготовлении обеспечивает безусловное нахождение значений показателей и параметров в заданных допусках. В результате выполнения процедуры T_2 каждому параметру (показателю) в КД должны соответствовать установленные требования в графической или текстовой форме, что в конечном итоге обеспечит безусловное выполнение изделием функциональных задач;

3) Процедура T_3 служит для обеспечения гарантированного выполнения требований КД на этапах технологической подготовки и производства изделий. Задачей данной процедуры является исключение каких-либо искажений и интерпретаций технологами и производственниками требований надежности, установленных в КД, и подтверждение того, что конструкторские, технологические и метрологические методы изготовления, сборки, монтажа и контроля выстроены на единых принципах;

4) Процедура T_4 служит для обеспечения контроля за выполнением требований КД техническими службами контроля на производстве.

Все 4 процедуры рассматриваются как единая и неделимая совокупность процессов, обеспечивающих выполнение заданных требований к надежности. Если ТД по каким-либо причинам не разрабатывается, то технологическая часть КТАН до момента разработки ТД может не проводиться, тогда все выводы о надежности изделия строятся на допущениях, что условия производства позволяют изготовить изделие в строгом соответствии с КД, т.е. технологические и производственные ошибки исключены. В таком случае формула (2) преобразуется к следующему виду:

$$P(t) = P(A|B) \cdot P(\tau > t), \quad (3)$$

где A – событие, характеризующее готовность изделия функционировать без отказов с учетом риска нарушения работоспособности из-за конструкторских ошибок; B – событие, характеризующее готовность изделия функционировать без отказов с учетом риска нарушения работоспособности из-за технологических и производственных ошибок.

При этом формулы (2) и (3) связаны следующим соотношением:

$$P(A|B) > 1 - \gamma,$$

т.е. оценка надежности на основании лишь анализа КД будет всегда завышенной.

Принципы конструирования уникальных высокоответственных систем

Конструирование рассматривается как совокупность двух равно значимых процессов, которые осуществляются с позиций единства принципов осуществления процедур T_1 и T_2 : визуализации образа будущего изделия в виде чертежей (2D-проекции) или 3D-моделей и параметрического моделирования (оцифровки) конструкции.

Оцифровка конструкции заключается в составлении вектор-столбцов параметров (показателей) X и допусков ΔX :

$$X = (X_1 \dots X_n)^T, \quad (4)$$

$$\Delta X = (\Delta X_1 \dots \Delta X_n)^T, \quad (5)$$

которые количественно характеризуют свойства будущих изделий, обеспечивающих их работоспособность. При этом процедура обоснования параметров (показателей) T_1 сводится к подтверждению того, что все параметры и показатели X (4) (область состояний E) находятся в соответствующем заданном допуске ΔX (5) (области работоспособности G):

$$E \subset G,$$

$$\text{здесь } G = \{X_i(t) | X_{\min(i)} \leq X_i(t) \leq X_{\max(i)}\}.$$

Таким образом, параметрическое моделирование при конструировании играет ключевую роль, с одной стороны, позволяет оптимизировать конструктивные схемы и избегать принципиальных конструкторских ошибок, а, с другой стороны, составление вектор-столбца параметров (показателей) (4) может служить основой составления контрольного списка (чек-листа) для критериального контроля необходимости и достаточности установленных требований в КД (выполнение процедуры T_2). В этом случае, все расчеты по обоснованию параметров (выполнение процедуры T_1), которые сопровождают процесс проектирования и конструирования, производятся для подтверждения установленных в КД требований, причем общее количество таких расчетов определяется номенклатурой указанных требований.

Базовые инструменты повышения надежности

График рисунка позволяет визуализировать инструментарию, используемые при проведении проектно-конструкторских работ.

На участке ЖЦ $0-t_1$ (отрезок графика $0-A$) закладываются основные тактико-технические характеристики будущего изделия. Достижение этих характеристик определяется использованием наиболее общих стратегических принципов, как основополагающих истин, позволяющим формировать проектные решения для осуществления

будущего изделия. Рациональные принципы работы будущего изделия – залог его надежности. Число принципов невелико, они направлены на решение целевых задач и отражают общие закономерности их решения.

На участке ЖЦ t_1-t_2 (отрезок графика $A-B$), по мере увязки проекта, выбранные принципы осуществления изделия должны быть реализованы в проектные и конструкторские решения с помощью правил проектирования [10]. Правила вытекают из принципов и ими же определяются. Число правил может быть значительным, они направлены на решения частных задач и отображают определенные закономерности причинно-следственных связей.

Принципы отражают сущность явления, а правила – его отдельные стороны. Принципы и правила проектирования являются универсальными для определенного типа изделий, поэтому могут быть сведены в нормированный свод правил проектирования.

Основой обеспечения надежности является выполнение требований как осознанной необходимости соблюдения условий, которые должны быть строго исполнены. Такие требования должны быть в обязательном порядке установлены на участке ЖЦ t_2-t_3 (отрезок графика $B-C$) и в явном виде отображены в КД. Количество требований всегда больше используемых принципов и правил, поскольку они индивидуальны для каждого разрабатываемого изделия и используются для детализации принятых конструкторских решений.

Принципы и правила, формализованные должным образом, можно применять для составления контрольных списков (чек-листов), используемых при проектировании изделий. При установлении требований в КД необходимо использовать оцифровку конструкции, на основе которой должен быть создан контрольный список, служащий для критериальной оценки полноты установленных требований при конструировании.

Принципы оценки надежности

Поскольку надежность – это свойство, то ее мерой служит численная характеристика. Требование в КД – это ожидание достижения изделием после своего изготовления таких свойств, которые безусловно обеспечивают выполнение требуемых функций в заданных условиях и режимах эксплуатации. Искомые свойства всегда могут быть установлены на основе системного анализа. Если при проведении ФА выявить все режимы и условия эксплуатации, а в результате АХС определить худшие сочетания взаимоположений, взаимосвязей и взаимодействий критичных элементов, то при КТАН всегда существует возможность обнаружить такие свойства критичных элементов, которые необходимы для достижения поставленных целей. Это достигается применением метода антитезисов [10], когда в заданных режимах и условиях эксплуатации при худшем сочетании факторов выявляются причины отказов, а искомое свойство обнаруживается в результате построения логических формул типа «для того, что исключить причину отказа

в виде... / необходимо, чтобы (такой-то) критичный элемент обладал свойством...». Далее каждое свойство выражается количественно в виде параметров (показателей) и их допустимых значений. Каждое из таких свойств характеризуется вероятностью событий, заключающихся в нахождении соответствующего параметра (показателя) в установленном пределе. При последовательном осуществлении i событий общая оценка ВБР изделия $P(t)$ в результате выполнения процедуры T_1 равна:

$$P(t) = \prod_{i=1}^n P_i(t), \quad (6)$$

здесь

$$P_i(t) = P[X_{\min(i)} \leq X_i(\tau) \leq X_{\max(i)}; 0 \leq \tau \leq t].$$

Формула (6) без учета выполнения процедур T_2 - T_4 дает завышенный результат, поскольку невыполнение или ненадлежащее выполнение любой из конструкторско-технологических процедур снижает надежность. Поэтому АН производят по результатам анализа выполнения процедур T_1 - T_4 исходя из текущего состояния КД и ТД. В случае невыполнения или ненадлежащего выполнения любой из процедур по обеспечению надежности по какому-либо параметру или показателю, в формуле (6) следует применять понижающие корректирующие коэффициенты k_i , которые определяются, например, исходя из метода балльных оценок критичности отказов по ГОСТ 27.310, в результате чего:

$$P(t) = \prod_{i=1}^n k_i P_i(t).$$

Заключение

В статье показаны возможности обеспечения надежности УВС с помощью конструкторско-технологических процедур, применяемых на каждой из стадий ЖЦ до начала эксплуатации. Применение таких процедур способно на единой теоретической и методологической основе поднять на соответствующий уровень технологию проектирования, конструирования, подготовки производства, изготовления и на этой же основе создать методику оценки надежности УВС.

Библиографический список

1. Болотин В.В. Теория надежности механических систем с конечным числом степеней свободы // Изв. АН СССР. Механика твердого тела, 1969. – № 5. – С. 74-81.
2. ГОСТ Р 56526-2015. Требования надежности и безопасности космических систем, комплексов и автоматических космических аппаратов единичного (мелкосерийного) изготовления с длительными сроками активного существования. – М.: Стандартинформ, 2015. – 49 с.
3. Барлоу З., Прошан Ф. Статистическая теория надежности и испытания на безотказность. – М.: Наука, 1984. – 328 с.

4. Тимошенков С.П., Симонов Б.М., Горошко В.Н. Основы теории надежности. – М.: Юрайт, 2015. – 445 с.
5. Ушаков И.А. Надежность – мой компас земной, а удача награда за смелость. Human factors in reliability или Неформальная история теории надёжности [Электронный ресурс] // Gnedenko e-Forum : International Group on Reliability. URL: <http://gnedenko-forum.org/history.htm> (31.08.2016).
6. Половко А.М., Гуров С.В. Основы теории надежности. – СПб.: БХВ-Петербург, 2006. – 704 с.
7. ГОСТ 27.002-89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. М.: Изд-во стандартов, 1990. 37 с.
8. Похабов Ю.П. О философическом аспекте надежности на примерах уникальных высокоответственных систем // Надежность. – 2015. – № 3. – С. 16-27.
9. Похабов Ю.П. Подход к обеспечению надежности уникальных высокоответственных систем на примере крупногабаритных трансформируемых конструкций // Надежность. – 2016. – № 1. – С. 24-36.
10. Похабов Ю.П., Валишевский О.К. Генезис надежности уникальных высокоответственных систем // Надежность. – 2016. – №3. – С. 47-53.
11. Барт Т.В. Управление качеством. – М.: Издательство МИЭМП, 2010. – 256 с.
12. Бушуев В.В. Практика конструирования машин: справочник. – М.: Машиностроение, 2006. – 448 с.
13. ГОСТ 22487-77. Проектирование автоматизированное. Термины и определения. – М.: Изд-во стандартов, 1978. – 11 с.
14. Р 50.1.031-2001. Информационные технологии поддержки жизненного цикла продукции. Терминологический словарь. Часть 1, Стадии жизненного цикла продукции. – М.: Изд-во стандартов, 2001. – 30 с.
15. ГОСТ ISO 9000-2011. Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь. – М.: Стандартинформ, 2012. – 43 с.
16. СТО 154-238-2014. Управление проектированием и разработкой космического аппарата с использованием требований зарубежных стандартов. – Железногорск: АО ИСС, 2014. – 60 с.
17. Design for Reliability/ Edited by Dana Crowe & Alec Feinberg. NY: CRC Press. 2001. 220 p.
18. SAMCO Final Technical Report: F08a Guideline for the assessment of existing structures / W. Rucker, F. Hille, R. Rohrmann. Berlin: Federal Institute of Materials Research and Testing (BAM), 2006. 33 p.

Сведения об авторе

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

Поступила 31.08.2016