

Надежность в цифровых технологиях

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



Юрий П. Похабов

Резюме. Цель. Переход на цифровые технологии индустрии 4.0 позволит в недалеком будущем создавать все больше изделий с уникальными потребительскими свойствами «с первого предъявления» (фактически без материальных затрат на экспериментальную отработку и доработку конструкций по результатам испытаний). Обеспечить расчеты показателей надежности таких изделий достоверными статистическими данными будет крайне затруднительно. Однако потребность в надежных изделиях останется. При этом сами подходы к цифровым технологиям на основе физических моделей и инженерных знаний дают возможность создать прогнозные методы обеспечения надежности (исходя из недопустимости либо, наоборот, умышленного программирования отказов). Это неизбежно ведет к смене парадигмы современной теории надежности, связанной с вынужденным отходом от математических моделей теории надежности в качестве базовых.

Методы. В отечественных традициях принято определять надежность путем задания требуемых функций набором параметров, характеризующих способность их выполнения, и допустимых пределов изменения значений этих параметров. Если критерии каких-либо из требуемых функций не могут быть установлены с помощью параметров, то можно использовать прием, согласно которому функционирование объекта подменяют информационной моделью в виде черного ящика, в котором выполнение требуемых функций характеризуют вероятностными показателями отказов (статистическими, логическими, байесовскими, субъективными). Чтобы с единых позиций учесть параметры и вероятности выполнения требуемых функций, нахождение значений параметров в допустимой области можно характеризовать вероятностью, как степенью уверенности в совершении такого события, например с учетом конструктивных запасов. В этом случае выполнение всех требуемых функций может быть охарактеризовано аддитивным показателем надежности, который определяют методом структурной схемы надежности. Такой показатель в полной мере характеризует прогнозный уровень надежности. **Результаты.** Оценку прогнозируемой надежности производят с помощью методики конструкторско-технологического анализа надежности (КТАН). Эта методика позволяет с помощью набора алгоритмизированных методов представить конструкторскую (по ГОСТ 2.102) и технологическую (по ГОСТ 3.1102) документацию технического объекта в виде обобщенной параметрической модели функционирования. Такая модель позволяет учитывать индивидуальные конструктивные особенности изделий исходя из единства функциональности, работоспособности и надежности, и на этой основе оценивать вероятности возможных отказов. Алгоритмы проведения КТАН и цифровых технологий проектирования полностью совместимы и обусловлены общими задачами по обоснованию конструкторских решений для исключения (снижения вероятности) ошибок, способных вызвать отказы, на основе аналитической, расчетной и экспериментальной верификации. **Выводы.** Цифровые технологии предоставляют реальную возможность прогнозировать, смягчать или исключать возможные отказы. Достичь этого можно точно такими же подходами, которые подчас и приводят к отказам, – конструкторско-технологическими. Для этого необходимо создавать новые приложения современной теории надежности на базе инженерных дисциплин и конструкторско-технологических методов обеспечения качества и надежности изделий.

Ключевые слова: цифровые технологии, теория надежности, прогнозирование надежности, уникальная высокоответственная система, конструкторско-технологический анализ надежности (КТАН).

Для цитирования: Похабов Ю.П. Надежность в цифровых технологиях // Надежность. 2020. № 2. С. 3-11. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2020-20-2-3-11>

Поступила 24.01.2020 г. / После доработки 17.04.2020 г. / К печати 17.06.2020 г.

Введение. На закрытии конференции MMR-2004 в Санта-Фе (США) состоялась дискуссия «Жива ли еще теория надежности?», которая послужила лейтмотивом статьи И.А. Ушакова, подытоженной словами: «*Нужда в чистой теории, может быть, и спала, но нужда в приложениях теории надежности к решению практических задач была, есть и будет!*» [1]. Список задач, ожидающих создания новых приложений теории надежности, был опубликован четырьмя годами раньше – на пленарном заседании конференции MMR-2000 в Бордо (Франция) в докладе «Надежность: прошлое, настоящее, будущее» [2]. Несмотря на вполне понятный вектор приложения усилий, некоторые из перечисленных проблем теории надежности так до сих пор и не разрешены, например вопросы надежности уникальных высокоответственных систем (изделий, объектов) [3].

За прошедшие годы к нерешенным проблемам теории надежности добавились новые задачи в свете четвертой промышленной революции [4]. Современному поколению инженеров сложно даже представить, к каким технологическим сдвигам приведут результаты этой революции, но начинать готовиться к этому приходится прямо сейчас. Пока же, как предтеча прогнозируемого будущего, возникли и начинают развиваться новые направления в инженерной деятельности: системная инженерия (проектирование «с первого раза правильно») [5] и цифровые технологии индустрии 4.0 (создание продукции «с первого предъявления») [6]. Набирает обороты тенденция, согласно которой показатели надежности в цифровой инженерии уже не рассматриваются в качестве целевых. Считается, что в случае достижения заданных целевых показателей работоспособности и ресурсных ограничений (временных, финансовых, технологических, производственных и т. д.) надежность обеспечивается сама собой по умолчанию [5, 6]. Например, остаточный ресурс изделия теперь может быть задан и определен в явном (параметрическом) виде по результатам численного моделирования физических процессов, приводящим к его потере. Само понятие «надежность» начинает размываться: надежность в цифровых технологиях, вроде бы, никуда не делась (ее по-прежнему надо обеспечивать), но как контролировать показатели надежности – непонятно (большая часть процессов при разработке и отработке изделий переносится в виртуальную область вычислений, производство материальных объектов, в первую очередь, для экспериментальной отработки сводится к минимуму, а математический аппарат современной теории надежности оказывается к этому не приспособленным). Однако, самое главное, никого уже сегодня не устраивает основа современной теории надежности – это, по выражению А.С. Проникова, *констатация того или иного уровня надежности для машины, уже отработавшей свой ресурс* [7].

Если при решении предстоящих задач подходы к надежности не изменятся, то для следующего поколения инженеров ценность современной теории надежности

рискует исчезнуть, как не дающая пищи для новых инженерных идей. С этим ничего не поделаешь, так было и так будет: «*Мы знаем, что у каждого поколения есть свои проблемы, которые последующее поколение или решает, или отбрасывает как бесполезные и заменяет на новые*» [8]. И тут уж в пору задаться вопросом куда более кардинальным, чем в начале 2000-х годов, а нужна ли нам вообще в эпоху цифровых технологий теория надежности?¹ Задаваясь таким провокационным вопросом, автор ни в коей мере не отвергает теорию надежности, сопромат или любые другие инженерные (технические) дисциплины, и потому склонен понизить его остроту другим вопросом, а каким требованиям в эпоху цифровых технологий должны удовлетворять приложения теории надежности и другие инженерные дисциплины?

Задачи теории надежности для цифровых технологий. Поскольку любые технические объекты создают инженеры, использующие в работе компьютеры, то справедливо полагать, что навыки и умения владения расчетными формулами в эпоху компьютерных технологий также необходимы и важны, как и в докомпьютерные времена (хотя бы для осознания результативности своей работы). Тем более что компьютер – это всего лишь высокоскоростное устройство для проведения вычислений (будь то выполнение чертежей, либо численные расчеты методом конечных элементов). При решении инженерных задач компьютер не осуществляет самостоятельного поиска областей, в которых должен находиться конечный результат, а лишь производит заданные вычисления по установленному алгоритму. Прерогатива человека заключается в том, чтобы, задав соответствующие исходные данные, направить имеющиеся ресурсы компьютера в требуемую область для получения наиболее оптимального результата [10]. Без знания законов естественных наук, владения техническими дисциплинами и умения делать элементарные инженерные расчеты справиться с такой задачей на должном уровне вряд ли получится. Тем более что (согласно одному из своих терминологических определений по ГОСТ 27.002–2015) надежность призвана быть своего рода вершиной инженерных знаний (для определения «*значений всех параметров, характеризующих... требуемые функции*»), и в эпоху компьютерных технологий не только не теряет своего значения, но приобретает еще большую значимость. Во-первых, выполнение объектами требуемого служебного назначения с заданной надежностью так и останется главной целью любой разработки. Во-вторых, отказы при наработке (в зависимости от назначения объектов) должны стать прогнозируемыми (недопустимыми либо, наоборот, умышленно программируемыми). Как раз для

¹ Как бы не казался такой вопрос несурзным, но сегодня на полном серьезе обсуждается идея, что современному инженеру, работающему с компьютерными вычислениями, знания сопромата уже ни к чему, поскольку их заменит программное обеспечение [9].

этого и предназначены цифровые технологии – моделировать неблагоприятные сценарные события и тем самым способствовать выбору оптимальных результатов. По мнению автора, собственно на решение этих задач должны быть направлены новые приложения современной теории надежности, чтобы успеть оказаться полезными при реализации цифровых технологий.

Барьеры современной теории надежности на пути цифровых технологий. Компьютерные вычисления производят по заданным алгоритмам (точным предписаниям, определяющим последовательность элементарных операций над исходными данными), будь то простейшие арифметические действия или численные решения дифференциальных уравнений. Рассчитать надежность с помощью компьютерных вычислений напрямую невозможно, поскольку ее нельзя выразить, вычислить или измерить с помощью физических величин, в первую очередь, из-за многофакторности и междисциплинарности возможных причин отказов, которые не поддаются алгоритмизации. По этой причине в докомпьютерные времена для расчета показателей надежности был создан специальный математический аппарат, который позволяет определять надежность с помощью апостериорных знаний о возможных отказах, т. е. по сути дела – через известную из опыта ненадежность. В результате получился замкнутый и порочный круг, чтобы вычислить надежность какого-либо технического объекта, нужно обязательно знать его ненадежность. Имея соответствующие статистические данные об отказах, сделать это несложно; трудности начинаются тогда, когда неоткуда взять статистику отказов, например, если прототипы еще не существуют, объекты являются единичными (уникальными)¹ или же по условиям функционирования отказы недопустимы. Как поступать в таком случае, не может подсказать ни один нормативно-методический документ по надежности.

В справочном приложении к ГОСТ 27.002–89² в явном виде указано, что область расчетов показателей надежности (согласно правилам статистической теории надежности) ограничена исключительно крупносерийными объектами. Для уникальных и малосерийных объектов применение расчетов методами статистической теории надежности ограничено лишь теми случаями, когда расчет показателей надежности может быть проведен по известным показателям надежности компонентов и элементов. Теоретически такая возможность обоснована, например, в работе [11], но для этого необходимо знать данные по надежности компонентов и элементов,

которые можно получить из статистических испытаний в объеме требуемой генеральной совокупности, что, например, для уникальных высоконадежных систем сделать практически невозможно по финансово-экономическим ограничениям [12].

С внедрением цифровых технологий проблема расчета надежности на базе статистической теории надежности усугубляется, поскольку число отработочных (инженерных) моделей при разработке и постановке продукции на производство должно неизбежно сократиться за счет переноса в виртуальную среду реальных процессов (действий, проверок и испытаний), связанных с материальными объектами [6]. Таким образом, в условиях применения цифровых технологий исчезает базис статистических методов теории надежности – накопление и обработка статистической информации об отказах объектов. Задавать вероятностные показатели надежности в качестве исходных данных для цифровых вычислений становится бессмысленно не только с позиций фундаментальных основ статистической теории надежности (из-за отсутствия сведений по отказам). Сама вероятность, являясь численной мерой проявления событий, абстрагированной от алгоритма их совершения, не подлежит прямым компьютерным вычислениям.

Тем не менее, если можно вычислить значение некоего параметра и соотнести его с крайними допустимыми значениями, то уместно говорить о вероятности нахождения значения данного параметра в допустимой области (как степени уверенности в совершении такого события³). Если технический объект можно представить набором параметров и допустимыми ограничениями их значений, то это дает возможность определять его надежность как аддитивный показатель, характеризующий выполнение требуемого служебного назначения при моделировании возможных сценарных событий при функционировании (по сути, как показатель прогнозируемой надежности). Подсчитать благоприятные (неблагоприятные) исходы таких событий для современных компьютеров не представит труда, если будет задан соответствующий алгоритм вычислений. Однако современные приложения теории надежности таких алгоритмов не предоставляют.

Современный уровень решения задач надежности высокоответственных объектов. Барьеры современной теории надежности на пути цифровых технологий в равной степени являются препятствиями и при создании высокоответственных объектов без прототипов. Отсутствие необходимых статистических данных и сложность проведения расчетов показателей надежности привели к пониманию того, что сами по себе расчеты выполняют всего лишь вспомогательную функцию для принятия

¹ Единичное (уникальное) изделие: Единственное по своей конструкции или по большой редкости и значимости изделие [ОСТ 134-1032–2003, статья 3.1].

² ГОСТ 27.002–89 отменен с 2017 г., но справочное приложение к нему вполне можно считать отдельным источником, поскольку оно написано на основании 12 публикаций, большинство из которых являются хрестоматиями современной теории надежности.

³ Вероятность: Действительное число в интервале от 0 до 1, относящееся к случайному событию. Примечание: Число может отражать относительную частоту в серии наблюдений, или степень уверенности в том, что некоторое событие произойдет. Для высокой степени уверенности вероятность близка к единице. [ГОСТ Р 50779.10–2000, статья 1.1].

конструкторских решений при разработках, уступая главенствующую роль методам экспертной и верификационной деятельности, что отражено за рубежом в нормативных и литературных источниках:

- ...следует отметить, что значение параметра надежности является условным показателем вероятности отказов. Он используется скорее, как средство для развития последовательных проектных правил, чем для описания частоты отказов конструкций, – одно из разъяснений, содержащихся в стандарте европейской системы проектирования Eurocode EN 1990:2002;

- ...более важно идентифицировать и, по возможности, смягчить последствия видов отказов мерами проектирования, чем знать вероятность их проявления, – пояснение к определению видов отказов в IEC 60812:2006;

- ...все методы оценки надежности требуют экспертных оценок специалистов. Когда мы подходим к этому, значения вероятностей во многом напоминают бирку, которую инженер навешивает на какую-то конструкцию, чтобы показать, что он думает про ее надежность, – высказывание Charles Harlan – руководителя по безопасности и надежности космической программы «Space Shuttle» [13].

Указанные взгляды реализованы в положениях стандартов NASA и ESA, где расчеты являются одной из составных частей процессной деятельности по аналитической и экспериментальной верификации ракетно-космической техники. Однако результаты такой верификации на практике пока оставляют желать лучшего. Например, после гибели шаттла «Челленджер» STS-51L применение одного из основных средств аналитической верификации – метода FMEA – подверглось резкой критике в американских инженерных кругах [13]. Согласно результатам предварительного анализа возможных отказов и их последствий, был допустим лишь один из 10 000 полетов, который мог бы завершиться катастрофой. Однако на практике в результате 135 полетов погибли два шаттла («Челленджер», 1986 и «Колумбия», 2003). Такая ошибка при использовании FMEA является беспрецедентно катастрофичной – безотказность по факту составила 0,985, вместо прогнозируемой 0,999 9. Аналогичный результат следует из статистики отказов раскрывающихся конструкций на зарубежных и российских космических аппаратах за 2009–2016 гг. Средняя безотказность срабатывания механизмов раскрытия не превысила значений 0,996 вместо допустимой безотказности не ниже 0,999 5 (с оговорками, допускающими, что такая оценка является сильно завышенной из-за неполной статистики отказов) [14]. Следует учитывать тот факт, что на практике в каждом случае результаты расчетов (верификации) надежности по действующим нормативам обязаны подтверждать указанную выше допустимую безотказность, иначе запуски космических аппаратов попросту бы не состоялись из-за необоснованности разработки. Чтобы выяснить, почему же результаты оценки надежности не

соответствуют действительности, были проведены исследования реальных причин отказов, которые показали, что в подавляющем большинстве случаев они имеют редкий характер, определяемый неблагоприятным сочетанием допусков на изготовление, неучтенными факторами технологической наследственности и внешних воздействий, что современные методики верификации надежности не учитывают [14]. Выявлено также, что для высокоответственных изделий любая редкая причина отказа способна понизить точность оценки надежности, при этом суммарная ошибка расчета на практике может достигать не менее порядка величины значащей цифры¹, что и подтверждается приведенными выше примерами.

Подход к прогнозированию надежности высокоответственных объектов. Предположим, что функционирование любого объекта можно представить набором параметров, значения которых могут изменяться в заданных диапазонах своих значений (т. е. в строгом соответствии с одним из определений термина «надежность»). Каждый из таких параметров рассматривается с позиций сопротивляемости возможным отказам под действием внешних воздействий, которые в свою очередь определяют ограничения на изменения значений анализируемых параметров [15]. В этом случае, сочетая параметры воздействий и сопротивляемости, на основе физических законов природы можно построить модель безотказного функционирования с учетом изменения во времени предельных значений рассматриваемых параметров, которая, в отличие от математических моделей теории надежности, становится пригодной для прогнозирования надежности (пример подобной модели для поворотной штанги космического аппарата приведен в работе [16]). В такой модели сам перечень этих параметров будет характеризовать функциональность объекта (совокупность свойств, определяемых наличием и набором возможностей выполнять требуемые функции), заданный диапазон изменения значений параметров – его работоспособность (состояние, в котором объект способен выполнять требуемые функции), а вероятность нахождения значений параметров в заданном диапазоне при функционировании – надежность (свойство сохранять во времени выполнение требуемых функций в заданных режимах и условиях эксплуатации) [16].

Если исходить из того, что все отказы объекта происходят исходя из физичности (закономерностей причинно-следственных связей) и физической необходимости (непротиворечия законам природы) порождающих их причин (не зависимо от того, знаем мы эти причины или нет), то на основе знаний законов физической природы можно построить параметрическую модель функционирования объекта, определяющую его функциональность,

¹ По аналогии с инженерными расчетами – это соответствует точности искомого результата не на проценты (обычно нормой считается погрешность 5÷10%) и даже не в разы (например, в два-три раза), а на порядки, т. е. не менее, чем в десять-сто раз (!).

работоспособность и надежность на основе единой информационной базы – параметров и диапазонов их допустимых значений. Построение такой модели обусловлено знаниями физических основ природы на уровнях микромира (мира элементарных частиц, атомов, молекул и молекулярных соединений), макромира (мира устойчивых форм и соизмеримых человеку величин) и мегамира (окружающего мира, соразмерного со вселенной). Значения параметров параметрической модели функционирования вычисляют известными методами инженерных дисциплин – теории машин и механизмов, теоретической механики, сопротивления материалов, строительной механики, деталей машин и т. д.

Если знаний или пониманий на любом из уровней устройства мира недостаточно для вычисления значений параметров параметрической модели функционирования объекта, то можно использовать известный прием, согласно которому функционирование какой-либо из составных частей объекта подменяется информационной моделью в виде черного ящика, в котором выполнение требуемых функций характеризуют вероятностными показателями отказов (статистическими, логическими, байесовскими, субъективными). Чтобы учесть вероятностные показатели таких информационных моделей для расчета надежности с помощью обобщенной параметрической модели функционирования объектов, необходимо значения параметров и вероятностных показателей привести к согласованному безразмерному виду. Для этого определяют вероятность нахождения значений параметров в допустимом диапазоне (исходя из их физического понимания [16]), после чего все вероятности, независимо от своего происхождения (исходя из физических либо информационных моделей) окажутся пригодными для расчета надежности методом структурной схемы надежности [14, 16]. Причем это не противоречит идее расчета надежности уникальных и малосерийных объектов по известным показателям надежности компонентов и элементов.

Для определения вероятностей нахождения значений параметров в допустимых областях могут быть использованы два взаимозаменяемых метода: детерминированный (путем задания конструктивных запасов по каждому из параметров таким образом, чтобы гарантировать с определенным доверием нахождение их значений в допустимой области) [14] и стохастический (например, путем оценки конструкционной индивидуальной надежности [17], суть которой заключается в вычислении вероятностей нахождения параметров в допустимых областях исходя из индивидуальных характеристик материалов, процессов нагружения/воздействий и технологий изготовления изделий). Взаимозаменяемость указанных методов можно пояснить на примере модели расчета прочности по схеме «параметр нагрузки – параметр прочности», когда вероятность безотказной работы совпадает с вероятностью того, что в пределах заданного отрезка времени значение параметра нагрузки ни разу не превысит значение, которое принимает па-

раметр прочности. При этом, даже если оба параметра являются случайными функциями времени, применяя конструктивные запасы согласно ГОСТ Р 56514–2015 – «расширяя» область действительных значений «параметра нагрузки» с помощью коэффициентов безопасности и/или «сужая» допустимую область «параметра прочности» за счет запасов прочности, можно решать задачу надежности в детерминированной постановке по расчетным значениям нагрузки и запасов прочности [16], что нашло широкое распространение в ракетно-космической отрасли.

Примеры применяемых на практике конструктивных запасов в виде резервирования, коэффициентов безопасности, запасов прочности и движущих моментов (сил), параметрической избыточности, силовых и температурных развязок, процедур получения гарантированных результатов, например, с применением минимаксных критериев или с использованием факторов инженерной психологии, приведены в работах [14, 16]. Все конструктивные запасы назначают исходя из правил статистической теории надежности (например, коэффициенты безопасности и запасы прочности [18]), подтвержденной практики применения (например, запасы движущих моментов (сил) [14, 19–20]), конструктивных приемов, направленных на снятие ограничений по изменению выходных параметров (например, путем использования силовых и температурных развязок [21–22]), или иных организационно-технических действий, снижающих либо исключающих вероятность возникновения отказов.

В общем случае, например для раскрывающихся конструкций космического аппарата, надежность по параметру «прочность» может быть рассчитана детерминированным методом по ГОСТ Р 56514–2015, а надежность по функционированию – стохастическим методом [20], либо в любых иных комбинациях [14, 17]. При этом использование конструктивных запасов для решения задач надежности в детерминированной постановке не только упрощает выбор и обоснование параметров при конструировании объектов, но является одним из важных условий по составлению исходных данных для цифрового проектирования в виде матрицы целевых показателей и их ограничений [6].

Конструкторско-технологические методы решения задач надежности высокоответственных объектов. Различные аспекты приведенного выше параметрического подхода к решению задач надежности высокоответственных объектов (философия, генезис, дефиниции, теоретические вопросы, модели, расчеты, практическое применение и т. п.) подробно рассмотрены в работе [14], что послужило основой разработки методики конструкторско-технологического анализа надежности (КТАН). Такая методика, опираясь как на инженерные дисциплины, так и на математические основы теории надежности (если это допустимо и обосновано), позволяет проводить анализ и учет индивидуальных конструктивных особенностей изделий,

что дает возможность прогнозировать надежность при проектировании и конструировании технических объектов без прототипов.

В основе методики КТАН лежит обобщенная параметрическая модель функционирования в виде [16]

$$\{X_i\} = (X_1, X_2, \dots, X_i)^T \quad \forall i = \overline{1, n}; \quad (1)$$

$$D_x = \{X_i(t) | \alpha_i \leq X_i(t) \leq \beta_i\}; \quad (2)$$

$$R = P\{X_i(t) \in D_x, 0 < t < t_k\}, \quad (3)$$

где $\{X_i\}$ – множество выходных параметров X_i , определяющих выполнение требуемых функций, в виде вектор-столбца (функциональность объекта); D_x – область допустимых значений выходных параметров $X_i(t)$ (работоспособность объекта в допустимых диапазонах изменения значений параметров – α_i и β_i); R – надежность объекта как вероятность P нахождения значений выходных параметров $X_i(t)$ в области их допустимых значений D_x за время наработки до отказа t_k .

Методика КТАН – это последовательный набор алгоритмизированных методов, позволяющих представить конструкторскую (по ГОСТ 2.102) и технологическую (по ГОСТ 3.1102) документацию технического объекта (которая в зависимости от способа разработки является его текстографической или цифровой моделью) в виде обобщенной параметрической модели его функционирования (1) – (3). Процедуры методики позволяют (укрупненно) производить:

- инициализацию объекта в виде параметризации (превращения его в набор параметров и допустимых диапазонов их изменения), которая проводится для установления условий (1) – (2);
- подсчеты теоретической надежности по параметрам проектирования, выполняемые согласно (3);
- предоставление доказательств того, что анализ (оценка) надежности соответствует действительности (требованиям конструкторской и технологической документации, условиям осуществления производства, методам контроля качества), для чего делают оценку соответствующих рисков [23].

Использование обобщенной параметрической модели функционирования (1) – (3) и методики КТАН [16] не нарушает базовых принципов теории надежности. Наряду с прикладными методами теории надежности (математическими, статистическими и физическими), конструкторско-технологические методы позволяют расширить возможности теории надежности по прогнозу надежности технических объектов и сделать решение задач надежности понятными и доступными для инженеров. Методика КТАН была опробована при конструировании механических устройств одноразового срабатывания космического назначения и узлов гидроавтоматики технологического оборудования нефтяных скважин [14], что позволило:

- обнаружить конструкторские и технологические ошибки в технической документации;
- произвести оценку эффективности существующей расчетно-экспериментальной отработки конструкции изделий;
- оценить достаточность установленных требований в конструкторской документации;
- выявить недопустимые сочетания параметров конструкций исходя из конструктивных ограничений, реальных условий изготовления и контроля;
- сделать выводы об отказоспособности изделий;
- произвести прогнозную оценку выполнения заданных требований к надежности;
- выдать рекомендации по изменению конструкции для обеспечения заданной надежности изделий.

Сопоставимость КТАН с существующими прогнозными подходами к надежности. Идея проведения анализа (оценки) надежности с учетом конструкторских и технологических факторов не является оригинальной. Необходимость этого неоднократно отмечалась и обосновывалась, например, в работах [24–26]. Однако методик анализа и оценок конструктивно-технологических факторов, которые позволяют конструкторам высокоответственных систем принимать свои решения с учетом надежности (насколько известно автору), еще не разработано.

Отдельные аспекты учета конструктивных факторов, влияющих на надежность, хорошо известны в литературе. Например, основы расчета надежности по прочности изложены в работе [27], а подходы к расчетам надежности механических частей конструкции летательных аппаратов с учетом обеспечения прочности и функционирования при срабатывании механизмов раскрытия приведены, например, в работах [28, 29]. Параметры, по которым в указанных примерах проводят расчеты надежности, входят составной частью в вектор-столбец (1). Расчеты на работоспособность и надежность осуществляют по формулам (2) – (3) с учетом физических основ обеспечения искомых параметров. Однако, как показывает практика [14], для расчета высоконадежных систем необходимо учитывать дополнительные факторы, влияющие на надежность. Такими факторами могут служить, например, внезапное исчезновение зазоров в кинематических парах, недостаточная виброустойчивость соединений, попадание в механизм раскрытия посторонних предметов (технологических элементов или смежных частей конструкций), нестабильность настроек механизмов, недостаточный ход актуатора, несоблюдение или неустановление режимов выполнения особо ответственных операций и т. д. [14, 16–17, 23].

Для установления выходных параметров, влияющих на надежность, производят конструкторско-технологический анализ надежности [14, 16], результатом которого является параметрическое описание функциональности (1), работоспособности (2) и надежности (3) конструкции. Причем, применение метода парирования [14, 16], с помощью которого осуществляют переход от возможных

отказов к искомым выходным параметрам, фактически позволяет рассматривать модель (1) – (3) как условие безотказного функционирования конструкции. Это в значительной степени повышает эффективность аналитической верификации, например, с использованием методики FMESA [30], которая основана на выявлении неблагоприятных отказов по степени тяжести их последствий и проведении экспертных оценок рисков возможных отказов, но не дает ответа, как предотвратить саму возможность возникновения отказов. Применение КТАН позволяет управлять отказами путем выбора значений параметров конструкции в условиях заданных ограничений (режимов и условий применения) исходя из математических уравнений (1) – (3), которые отражают совокупность знаний, представлений и гипотез при реализации выходных эффектов на базе физических законов природы.

Говоря о методике КТАН, важно понимать, что ее использование не подменяет и не подрывает существующих основ надежности (где это возможно, необходимо следовать общепринятым нормам надежности). Однако при отсутствии информации о надежности составных компонентов и недостаточных статистических данных об отказах изделий, указанная методика дает возможность избежать значительной части конструкторско-технологических ошибок, в т. ч. приводящих к редким отказам. Использование КТАН позволяет подвергнуть сомнению утверждение о том, что для высокоответственных систем (0,997 и выше) расчеты надежности невозможны и даже бессмысленны [12]. В парадигме методики КТАН, расчеты надежности высокоответственных систем жизненно необходимы, но процедура их проведения требует нормативного закрепления [23].

Кроме того, применение КТАН само по себе является необходимым, но не достаточным условием создания высокоответственных систем. Как и любой другой инструмент, он требует умелого обращения. В данном случае – это знания физических принципов работы технических объектов, основ инженерных дисциплин и конструкторско-технологических методов обеспечения качества и надежности. Причем, все то же самое требуется и при использовании цифровых технологий проектирования. К счастью, необходимость следования установленному алгоритму проведения КТАН в совокупности с возможностью получения апостериорных знаний (по результатам испытаний и эксплуатации) позволяет накапливать знания с каждым итерационным циклом проведения анализов и, при необходимости, создавать перечни (чек-листы) принципов проектирования и правил конструирования [14, 28], соответствующих конкретной предметной области разработок (что только усиливает эффективность методики).

Совместимость и обусловленность КТАН и цифровых технологий. С позиций целевой направленности на прогнозирование надежности, методики КТАН и цифровых технологий проектирования используют общие

процедуры – это обоснование конструкторских решений для исключения (снижения вероятности) ошибок, способных вызвать отказы, на основе аналитической, расчетной и экспериментальной верификации.

При этом методика КТАН является прерогативой человека – специалиста по надежности, следовательно, в системе «человек-компьютер» может сыграть ключевую роль при составлении исходных данных для компьютерных вычислений, ведь от их полноты и достоверности напрямую зависит эффективность цифровых технологий как таковых.

Сегодня для построения матрицы целевых показателей и ограничений, а также валидации результатов вычислений, на каждом итерационном шаге предполагается привлекать экспертов, руководствующихся исключительно личными знаниями и опытом [6]. Использование модели и методики КТАН позволяет на алгоритмизированной основе производить подготовку и верификацию исходных данных для компьютерных вычислений по формулам (1) – (2) и валидацию их результатов согласно (3). В результате чего решаются две задачи:

- отпадает необходимость в поисках уникальных и дорогостоящих экспертов (которых может в нужное время просто не оказаться под рукой);
- инженер в системе «человек-компьютер» получает возможность использовать системный подход, повышающий эффективность принимаемых им решений и позволяющий выполнять четкие действия при подготовке и проведении компьютерных вычислений.

Реализацию последней из указанных задач сложно переоценить. Технические и программно-вычислительные возможности компьютеров постоянно растут, а возможности человека, как творца техники, в последние годы напротив ухудшаются – качество его мышления не улучшается, аналитические способности не повышаются, а образовательная подготовка заметно упала. Если и дальше не повышать знания и не алгоритмизировать действия человека, все нарастающий разрыв в системе «человек-компьютер» способен привести к непредсказуемым последствиям, самым безобидным из которых может оказаться пророчество Роберта Шекли в рассказе «Верный вопрос».

Теоретически, моделируя работу технических объектов на уровне микро-, макро- и мегамира, можно получить обобщенную параметрическую модель функционирования (1) – (3), состоящую исключительно из параметров (принципы построения цифровых моделей этому не препятствуют и ограничены только вычислительными ресурсами). В этом случае потребуется лишь автоматизированная опция, позволяющая производить аддитивный подсчет (калькулирование) прогнозируемой надежности в результате проведения требуемых мероприятий по предупреждению отказов конструкционного характера. В противном случае (если не хватает знаний человека или вычислительных возможностей компьютера) необходимо участие человека в корректировке каль-

кулирования прогнозируемой надежности путем учета факторов, которые требуют вероятностных оценок на основе информационных моделей в виде черного ящика.

Использование КТАН в цифровых технологиях может оказаться незаменимым в случае проведения топологической оптимизации конструкций. В этом случае важно различать цели решаемых задач. Одно дело, когда топологическую оптимизацию проводят для сокращения издержек производства, другое дело, если сокращение таких издержек способно привести к рискам возникновения несоизмеримо больших потерь, чем выгода от сэкономленных средств при изготовлении. Например, масса конструкции механического узла космического назначения за счет топологической оптимизации может быть снижена на 1 кг, что приводит к экономии порядка 10^3 у.е. за счет цены заготовок на рынке и стоимости технологического передела. Однако несрабатывание механизма на орбите в результате проведенной топологической оптимизации способно привести не только к потерям порядка 10^6 у.е., соответствующим удельной стоимости выведения полезного груза, но и куда более критичным убыткам в виде стоимости потерянного космического аппарата и времени на его создание, затрат на повторное изготовление спутника и финансовых потерь из-за возможных репутационных издержек (например, удорожания стоимости страхования космических рисков). В этом случае прогноз надежности становится приоритетной задачей, решение которой должно строиться на научно-методологической основе.

Заключение. Цифровые технологии предоставляют реальную возможность прогнозировать, смягчать или исключать возможные отказы. Достичь этого можно точно такими же подходами, которые подчас и приводят к отказам, – конструкторско-технологическими. Для этого необходимо создавать новые приложения современной теории надежности на базе инженерных дисциплин и конструкторско-технологических методов обеспечения качества и надежности изделий.

Прошу всех, кого заинтересовали проблемы, изложенные в статье, высказаться, в т. ч. лично (pokhabov_yury@mail.ru).

Библиографический список

1. Ushakov I.A. Is Reliability Theory Still Alive? [Электронный ресурс] // Reliability: Theory & Applications: сетевой журн. 2017. No. 3(46). Vol. 12. P. 45-68. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/is-reliability-theory-still-alive-1/viewer> (дата обращения 15.04.2020)
2. Ушаков И.А. Надежность: прошлое, настоящее, будущее: пленарный доклад на открытии конференции «Математические методы в надежности» (MMR–2000), Бордо, Франция, 2000 // Надежность: Вопросы теории и практики: сетевой журн. 2016. No. 1(1). P. 17-27. URL: http://www.gnedenko.net/Journal/2006/RTA_1_2006.pdf (дата обращения 15.04.2020)
3. Похабов Ю.П., Ушаков И.А. О безаварийности функционирования уникальных высокоответственных систем // Методы менеджмента качества. 2014. № 11. С. 50–56.
4. Шваб К. Четвертая промышленная революция. М.: Эксмо, 2016. 138 с.
5. Левенчук А. Системноинженерное мышление в управлении жизненным циклом [Электронный ресурс] // Лабораторный журнал: [сайт]. [2014]. URL: <https://ailev.livejournal.com/1121478.html> (дата обращения: 15.04.2020)
6. Боровков А.И., Рябов Ю.А., Кукушкин К.В. Цифровые двойники и цифровая трансформация предприятий ОПК // Оборонная техника. 2018. № 1. С. 6–33.
7. Проников А.С. Надежность машин. М.: Машиностроение, 1978. 592 с.
8. Hilbert D. Mathematical Problems // Bulletin of the American Mathematical Society: journal. 1902. Vol. 8. No. 10. P. 437–479.
9. Кулешов А.П. Преодолеть сопротивление материалов: интервью 2 Февраля 2018 г. [Электронный ресурс] // Стимул: журнал об инновациях в России [сайт]. [2018]. URL: https://stimul.online/articles/interview/preodolet-soprotivlenie-materialov/?sphrase_id=1295 (дата обращения: 15.04.2020)
10. Доронин С.В., Похабов Ю.П. Повышение достоверности оценок прочности конструкций технических объектов // Вестник машиностроения. 2013. № 6. С. 85–88.
11. Болотин В.В. Применение методов теории вероятности и теории надежности в расчетах сооружений. М.: Стройиздат, 1971. 255 с.
12. Половко А.М., Гуров С.В. Основы теории надежности СПб.: БХВ-Петербург, 2006. 704 с.
13. Лернер Э. Альтернатива «запуску на авось» // Аэрокосмическая техника. 1987. № 9. С. 157–160.
14. Похабов Ю.П. Теория и практика обеспечения надежности механических устройств одноразового срабатывания. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2018. 338 с.
15. Плахотникова Е.В., Сафонов А.С., Ушаков М.В. Проектирование изделий с учетом требований к показателям надежности // Известия ТулГУ: Технические науки. 2015. Вып. 7. Ч. 1. С. 134–139.
16. Похабов Ю.П. Проектирование высокоответственных систем с учетом надежности на примере поворотной штанги // Журнал СФУ: Техника и технологии. 2019. Т. 12. № 7. С. 861–883.
17. Тимашев С.А., Похабов Ю.П. Проблемы комплексного анализа и оценки индивидуальной конструкционной надежности космических аппаратов (на примере поворотных конструкций). Екатеринбург: АМБ, 2018. 38 с.
18. Гладкий В.Ф. Вероятностные методы проектирования конструкции летательных аппаратов. М.: Наука, 1982. 524 с.
19. Золотов А.А., Похабов Ю.П., Гусев Е.В. Обеспечение проектной надежности раскрывающихся конструкций космических аппаратов // Полет. 2018. № 7. С. 36–45.

20. Похабов Ю.П. Способ выбора привода для поворота конструкции в шарнирном узле: пат. 2198387 Рос. Федерация. № 2000129330/28; заявл. 23.11.2000; опубл. 10.02.2003, бюл. № 4.

21. Похабов Ю.П., Гриневич В.В. Способ закрепления изделий: пат. 2230945 Рос. Федерация. № 2002113143/11; заявл. 18.05.2002; опубл. 20.06.2004, бюл. № 17.

22. Похабов Ю.П., Наговицин В.Н. Способ закрепления изделий статически неопределимой системой связей: пат. 2125528 Рос. Федерация. № 5067373/28; заявл. 29.09.1992; опубл. 27.01.1999, бюл. № 3.

23. Похабов Ю.П. Что понимать под расчетом надежности уникальных высокоответственных систем применительно к механизмам одноразового срабатывания космических аппаратов // Надежность. 2018. Т. 18. № 4. С. 28–35.

24. Hecht H., Hecht M. Reliability prediction for spacecraft: Report prepared for Rome Air Development Center: no. RADC-TR-85-229, Dec. / Rome Air Development Center. 1985. 156 p.

25. Saleh J.H., Caster J.-F. Reliability and Multi-State Failures: A Statistical Approach, First Edition. NJ.: John Wiley & Sons, 2011. 206 p.

26. Тестоедов Н.А., Михнев М.М., Михеев А.Е. и др. Технология производства космических аппаратов. Красноярск: СибГАУ, 2009. 349 с.

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

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

29. Кузнецов А.А. Надежность конструкции баллистических ракет. М.: Машиностроение, 1978. 256 с.

30. ECSS Standard. Space product assurance. Failure modes, effects (and criticality) analysis (FMEA/FMECA) (6 March 2009). ECSS Secretariat, ESA ECSS-Q-ST-30-02C. 74 p.

Сведения об авторе

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

Вклад автора в статью

Статья является результатом многолетней практики (с 1982 г.) проектирования, конструирования и обеспечения надежности механизмов раскрытия космических конструкций. С использованием авторской методики конструкторско-технологического анализа надежности (КТАН) в 2014–2019 гг. были проведены экспертизы отказоспособности механизмов раскрывающихся конструкций КА ведущих отечественных разработчиков (с выпуском научно-технических отчетов), которые выявили недостаточный уровень современных методов аналитической и экспериментальной верификации надежности в космической отрасли для обеспечения требуемой безотказности выше 0,999 и, как это не парадоксально, снижение качества разработок с позиций надежности при использовании цифровых технологий проектирования.