Надежность: взгляд конструктора

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. Предложить читателю взглянуть на надежность глазами конструктора, который обязан разработать изделие с заданными требованиями надежности. Результат такой работы – это еще не надежность как свойство, но способность, присущая конструкции, без которой требуемая надежность проявиться не может. Для проектирования высоконадежных изделий необходимо использовать формализованные практики с четким алгоритмом действий, которые, с одной стороны, не расходятся с положениями теории надежности, а, с другой стороны, должны быть полезными, понятными и доступными каждому конструктору для обеспечения требуемой надежности. **Методы.** В статье рассмотрены основные подходы, позволяющие конструктору, не нарушая существующих смысловых понятий и сложившейся терминологии надежности, решать задачи надежности технических объектов при проектировании и конструировании на базе инженерных дисциплин и конструкторско-технологических методов обеспечения надежности изделий, начиная с самых ранних стадий жизненного цикла. С использованием таких подходов к надежности, для предупреждения отказов вполне достаточно применять принципы физичности (закономерностей причинно-следственных связей) и физической необходимости (непротиворечия законам природы) порождающих их причин. **Результаты.** Приведены простые математические модели, с помощью которых составлена обобщенная параметрическая модель функционирования сложных технических систем. Исходя из приведенных моделей следует, что подход к расчету надежности по известным показателям надежности компонентов и элементов может быть заменен на оценку надежности по вероятностям выполнения компонентами и элементами требуемых функций. Данный вывод не только не нарушает положений теории надежности, но и делает надежность действенным инструментом конструктора для достижения заданной надежности. Решение обобщенной параметрической модели функционирования производится с использованием методики конструкторско-технологического анализа надежности, разработанного для анализа и оценки конструкторских решений при проектировании высоконадежных изделий. **Заключение.** Предлагаемые в статье понятия, подходы, модели и методы, позволяют конструктору относиться к надежности как к работоспособности, развернутой во времени. Такая надежность всегда конкретна и учитывает все специфические особенности изделия. В этом случае процесс конструирования и обеспечение надежности становится единой и неделимой частью работы при создании изделий независимо от их уникальности, серийности изготовления, наличия или отсутствия показателей надежности компонентов и элементов. Но, самое главное, такой подход к надежности, с одной стороны, не противоречит основам современной теории надежности, а, с другой стороны, снимает у конструктора восприятие надежности, как нечто инородное, не связанное с реальной конструкцией.

Ключевые слова: теория надежности, проектирование высоконадежных систем, расчет надежности, уникальная высокоответственная система, конструкторско-технологический анализ надежности (КТАН).

Для цитирования: Похабов Ю.П. Надежность: взгляд конструктора // Надежность. 2020. №4. С. 13-20. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2020-20-4-13-20>

Поступила 20.07.2020 г. / После доработки 31.08.2020 г. / К печати 18.12.2020 г.

Введение. Требования надежности должны быть заданы в техническом задании на разработку, как того требует, например, ГОСТ 15.016–2016. Для количественной оценки надежности принято использовать показатели, которые определяют исходя из статистических испытаний (эксплуатации) изделий либо их компонентов (элементов) ([1], Приложение (справочное). Пояснения к терминам, приведенным в стандарте). Однако прежде, чем возникнет сама возможность проведения таких статистических испытаний, на стадии выпуска рабочей конструкторской документации необходимо обосновать способность используемых инженерных решений обеспечить заданные требования надежности (обычно для этих целей принято проводить расчеты надежности по ГОСТ 27.301–95). Поскольку под надежностью чаще понимают безотказность, имеет смысл рассмотреть, что именно конструктор должен предпринять для обеспечения надежности, если она (для упрощения) задана вероятностью безотказной работы¹.

Чтобы выполнить требование технического задания по обеспечению заданной вероятности безотказной работы, конструктор, согласно современным представлениям о надежности, обязан разработать структуру изделия (как совокупность элементов и отношений между ними) с известными данными по надежности его компонентов и элементов в заданных режимах и условиях применения. Со стороны это может выглядеть как сборка LEGO для составления конструкции заданной надежности из компонентов и элементов с известными данными по надежности. Причем, если такие данные отсутствуют, то по канонам современной теории надежности их следует получить экспериментально [2–4]. На практике примерно так и поступают при проектировании радиоэлектронных средств с заданной надежностью на основе электро-радиоизделий с известными показателями надежности [5]. Электро-радиоизделия изготавливают массово, и они, как правило, достаточно компактны, чтобы иметь возможность лабораторно наработать статистические данные о надежности при заданных режимах применения в условиях предельных температур, термоциклирования, вакуума, радиации, агрессивных сред и т. п.

Для сложных технических систем (изделий), состоящих из разнотипных компонентов с различными принципами действия: корпусных деталей, механизмов, электромеханических устройств, радиоэлектронных сборок, пиротехнических средств и т. п., составление надежности по принципу LEGO может стать проблематичным. Нарботка статистических данных о надежности полноразмерных компонентов габаритных изделий (в первую очередь развертываемых крупногабаритных структур, сложных механических и электромеханических устройств, протяженных конструкций из композиционных материалов и проч.) в уникальных условиях

применения, отличных от нормальной земной среды (глубоко под водой или под землей, при повышенной радиации, в космическом пространстве и т. п.), скорее всего, будет невыполнима по технико-экономическим соображениям [6]. Можно, конечно, использовать данные о надежности объектов-аналогов, работающих в несколько иных режимах и условиях применения, например, для конструкций космических аппаратов, которые должны быть однократно развернуты на околоземной орбите, брать статистические данные при наземных срабатываниях (если бюджет финансирования позволяет провести требуемое число однородных независимых испытаний для подтверждения заданной надежности). Однако как в этом случае относиться к достоверности расчетов надежности – непонятно (ведь наземные условия испытаний отличны от условий штатного срабатывания в космосе). Еще хуже, когда изделие единичное (тем более уникальное), и данных о надежности объектов-аналогов просто не существует, например, если это десантный модуль межпланетного космического аппарата для полета на планету с венерианским типом атмосферы.

Более проблематичными могут оказаться случаи, когда безотказность задается не менее чем тремя девятками после запятой (с учетом округления до меньшего числа девяток для повышения достоверности). Формально это не исключает возможности отказов, тем не менее в каждом конкретном случае потеря функциональности недопустима, поскольку может привести к несоизмеримо большим потерям, чем финансовые затраты на разработку и изготовление отказавшего изделия. Характерный пример – это раскрытие конструкций автоматических космических аппаратов на околоземной орбите. Отказ любого из механизмов раскрытия может привести к гибели спутника. Например, из-за нераскрытия солнечных батарей в 2006 г. был утрачен спутник связи «Sinosat-2» стоимостью \$190 млн., а в 2019 г. – «Chinasat-18» – \$250 млн. Подобного рода инциденты, помимо прямых убытков из-за гибели космического аппарата, приводят к затратам на повторное изготовление замещающего спутника и финансовым потерям в результате репутационных издержек. Кроме того, в мирное время гибель телекоммуникационного спутника может привести к сбоям в глобальной системе связи с множеством рисков потерь из-за нарушений в передачи мобильной информации, а в военное – к критическому снижению (и даже утрате) государственной безопасности.

Если не существует возможности следовать правилам статистической теории надежности, конструктор вынужден решать проблемы обеспечения заданной надежности неформализованными эвристическими методами, которые либо не предполагают оценок надежности, либо допускают проведение расчетов надежности без учета специфики конструктивных особенностей изделий, но в любом случае они не позволяют получить ответа на вопрос, как именно достичь надежности, при которой отказы по тем или иным причинам недопустимы [7]. В этом случае остается уповать на случай или использо-

¹ Согласно ГОСТ Р 50779.10–2000 вероятность определяют действительным числом в интервале от 0 до 1, призванным отражать относительную частоту в серии наблюдений, либо степень уверенности в том, что некоторое событие произойдет.

вать такую методику конструирования, которая даже без достоверных статистических данных о надежности может быть полезна, понятна и доступна каждому конструктору при обеспечении требуемой надежности.

Почему делать и считать надежность – не одно и то же. Любой расчет параметров работоспособности направлен на обоснование решений конструктора по выбору материалов, заготовок, термообработки, покрытий, размеров, допусков и т. д. В основе таких расчетов лежит принцип избыточности для исключения (или снижения) факторов неопределенности между «необходимой» структурой изделия и «случайностью» внешних факторов среды. Степень такой избыточности определяет допустимое соотношение между заданной надежностью и возможной ненадежностью [8]. Яркий пример тому – это расчет на прочность. Избыточность природной прочности выбранных конструкционных материалов и назначаемых размеров конструкций, воспринимающих внешние нагрузки, определяет требуемый запас прочности и тем самым обуславливает выбор конструкторских решений (каким быть материалам, габаритам, массе, принципам действия, технологиям изготовления и прочим особенностям конструкции). Любой конструктор, зная, что его конструкция имеет недостаточный запас прочности (например, 0,9), обладает необходимыми знаниями из курса сопротивления материалов, которые позволяют конструктивными методами довести прочность до требуемого уровня. С надежностью все совершенно не так. Ни один конструктор, зная, что безотказность функционирования его конструкции составляет, например 0,998, не способен обосновать, как поднять надежность, положим, до 0,999. Мало того, по внешним признакам практически невозможно отличить изделия одинакового назначения с безотказностью, допустим 0,9 и 0,9 (т. е. ноль и девять в периоде). В то же время экспертное заключение по прочности способен дать любой квалифицированный инженер даже без проведения расчетов (хотя бы в категориях «крепкий – хлипкий»).

Такая неопределенность с надежностью объясняется тем, что она призвана интегрально характеризовать буквально все свойства изделия, способные повлиять на его безотказное функционирование, один только перечень которых не так-то просто выявить. Если взять, например, прочность, то она характеризует способность конструкционного материала сопротивляться разрушению под действием напряжений, возникающих от внешних сил, и одновременно является одним из свойств, которое составляет надежность. Причем, наряду с остальными составными свойствами надежности, прочность при оценке надежности необходимо рассматривать с позиции сохранения во времени (формально надежность – это свойство, характеризующее проявление свойств во времени). Поскольку сложные технические системы наделены суммой мультидисциплинарных свойств (вещественных, пространственных, временных, тепловых, электрических, механических и т. д.), каждое из которых изучают с помощью различных технических дисциплин,

то существует два возможных подхода к исследованию надежности:

- выявлять и учитывать при оценке надежности каждое из составных свойств изделия;
- не выделять по отдельности каждое из свойств изделия, а характеризовать его функционирование некими обобщенными показателями.

Следствием этих подходов в отечественной школе надежности стало (как минимум с 1989 г., как максимум с 1983 г.) единство и противоположность двух вариантов определения термина «надежность» – функционального и параметрического [9], приоритетность которых время от времени изменяется в терминообразующем стандарте надежности ГОСТ 27.002.

На практике оба подхода к надежности без каких-либо ограничений используют при расчетах на прочность с помощью модели отказов по схеме «нагрузка – прочность (сопротивление)». В этом случае считается, что вероятность безотказной работы (обобщенный показатель прочности) совпадает с вероятностью того, что в пределах заданного отрезка времени значение параметра нагрузки ни разу не превысит значение, которое принимает параметр прочности (конкретные параметры, влияющие на прочность) ([1], Приложение (справочное). Пояснения к терминам, приведенным в стандарте). Причем степень избыточной прочности, соответствующая заданной вероятности безотказной работы, на практике обычно нормируют установленными коэффициентами безопасности и запасами прочности [10]. Однако такая модель отказов справедлива только для случаев, когда надежность определяется исключительно прочностью или преимущественно прочностью, если требуемая надежность не слишком высокая.

Если на надежность, помимо прочности, в равной степени влияет какой-либо другой фактор, например, при функционировании подвижных механических узлов – это избыточность движущего момента, то надежность с учетом обоих факторов определяют методом фиктивных элементов [11]. Тем не менее и у такого подхода существуют ограничения. Он применим для обеспечения проектной надежности при обосновании принципиальных конструкторских решений по выбору проектных параметров конструкции. В рассматриваемом случае – это прочность конструкции и энергодостаточность приводов раскрытия, установленных в конструкцию, при условии, что она обладает требуемой прочностью [12]. При разработке рабочей конструкторской документации помимо обеспечения прочности и энергодостаточности приводов всегда требуется детально прорабатывать конструкцию с учетом технологических возможностей производства, в связи с чем появляется необходимость дополнительно рассматривать множество конструктивных и технологических факторов, влияющих на надежность [12]. Статистические методы расчета надежности в этом случае не подходят, поскольку не позволяют выявлять достаточные факторы для характеристики надежности с учетом конструктивных особенностей изделия и обосновать их количественно для подтверждения требуемых показателей надежности.

Основное противоречие между конструированием и исследованием надежности заключается в том, что согласно представлениям современной теории надежности, показатели надежности изделия характеризуют следствия, как результат конструирования без учета порождающих их причин, в то время как конструктор вынужден «конструировать» (принимать во внимание буквально все) причины для получения требуемого следствия – заданной надежности [13]. Иными словами, конструктор обязан оценивать и предупреждать практически все возможные причины отказов, а исследователю (расчетчику) надежности достаточно представить надежность вероятностным показателем, который интегрально характеризует все свойства изделия, позволяющие выполнить требуемые функции (не вдаваясь в причины невыполнения каждой из функций по-отдельности). В практическом плане специалист по надежности видит результат работы конструктора под углом случайности событий и процессов, причины которых не обязательно могут (или должны) быть известны, а для конструктора любая конструкция подчиняется принципу причинности: каждое его решение и действие влечет за собой причины потенциальных событий, способных привести к отказам. Таким образом, конструктор всегда рассматривает изделие в виде детерминированного комплекса причинно-следственных связей, а расчетчик надежности – как некий технический объект без учета генезиса, поведение которого постулируется в форме статистических гипотез. Именно такое различие взглядов конструктора и расчетчика надежности привело к тому, что в ракетно-космической технике бытуют выражения: «считают надежность те, кто ее не умеет делать» и «девятки не летают», которые лишний раз подтверждают отсутствие связи между результатом конструирования конкретного изделия и расчетом надежности на основе статистических данных объектов-аналогов.

Терминологический аспект конструкторского взгляда на надежность. Для обоснования уместности и целесообразности конструкторского взгляда на надежность, обратимся к терминологии надежности. Не вступая в терминологическую дискуссию [9], примем за основу определение термина «надежность» согласно ГОСТ 27.002: «Надежность – это свойство объекта сохранять во времени способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования». Несложно заметить, что термин «надежность» построен на основе терминологических элементов, значения которых в указанном же стандарте определены лишь для одного термина – «(технический) объект». Остальные терминологические элементы, имеющие существенное значение для однозначного понимания конструктором смысла надежности, в стандарте по терминологии надежности не определены, в первую очередь, – это такие термины как «свойство», «способность» и «(требуемая) функция». Возможно, таким образом разработчики стандарта сознательно предоставили право всем желающим

самостоятельно (на собственное усмотрение, исходя из конкретной специфики) определиться со значениями понятий, входящих в основной термин надежности. Воспользуемся таким правом с учетом специфики взгляда конструктора на проблемы надежности.

Термин «свойство» многократно определен в отечественных стандартах ГОСТ Р 8.614, ГОСТ Р ИСО 22745-2, ГОСТ Р 54136 и ГОСТ Р ИСО 15531-31, но, применительно к безотказным изделиям (работающим без отказов), автору статьи кажется наиболее подходящим емкое и афористичное понятие свойства, данное в работе [14], как *отношение вещей*. Терминологическое определение этого понятия выглядит следующим образом: «Свойство – философская категория, выражающая такую сторону предмета, которая обуславливает его различие или общность с другими предметами и обнаруживается в его отношении к ним» [15].

Термин «способность» определен в отечественных стандартах ГОСТ 33707 и ГОСТ Р ИСО 15531-1, но, опять же, применительно к безотказным изделиям (за неимением лучшего), автору статьи кажется уместным использовать данное понятие из толкового словаря [16]: «Способность – это качество, свойство, состояние, дающее возможность производить те или иные действия, исполнять ту или иную работу».

С определением термина «(требуемая) функция» по ГОСТ 27.002 дело обстоит сложнее. Во-первых, не очень понятно, чем «(требуемая) функция» отличается от понятий, используемых в других стандартах по надежности, – это «(заданная) функция» по ДСТУ 2860 и «(целевая) функция» из группы стандартов серии «Системы и комплексы космические». Учитывая, что «(требуемая) функция» и «(заданная) функция» безразлично используются в ГОСТ 27.002, то, вероятно, речь идет об эквивалентных понятиях. Во-вторых, учитывая различные омонимические и синонимические особенности понятия «функция», обратимся к определениям синонимического ряда указанного термина, которые ближе всего подходят к характеристике технических объектов (предполагая, что такая функция может безразлично выступать как требуемая, заданная или целевая):

- *описание (как правило, вербальное) служебного назначения изделия, т. е. того, что должно делать изделие (составная часть) при его применении (использовании)* [ГОСТ Р 53394, статья 3.2.4];
- *реализация объектом выходного эффекта¹;*
- *выполнение в объекте процесса, соответствующее его назначению, проявление заданного условия или свойства объекта согласно требованиям нормативно-технической, и (или) конструкторской (проектной) документации* [ДСТУ 2860, статья 3.1.8];
- *внешнее проявление свойств какого-либо объекта в данной системе отношений* [17].

¹ Определение термина принято согласно вновь разрабатываемому российскому стандарту «Системы и комплексы космические. Анализ видов, последствий и критичности отказов изделий и процессов. Общие требования».

Исходя из того, что требуемая функция – это функция, которая изначально задумана человеком (конструктором) и подлежит исполнению в процессе функционирования объекта для достижения служебного назначения, условимся в дальнейшем для безотказных объектов под **требуемой функцией** понимать *внешнее проявление ожидаемых свойств объекта в заданных режимах и условиях применения (при реализации объектом заданного выходного эффекта), которые установлены и соответствуют требованиям конструкторской документации.*

Отметим, что в рассмотренных понятиях «свойство», «способность», и «(требуемая) функция» в явном виде прослеживается упорядоченная эволюция состояний материи, изменяющейся во времени, в виде **свойств** как определенных отношений объектов в материальной системе, **способности** как состояния, дающего возможность проявления определенных свойств, и **требуемых функций** как реализации объектом предусмотренных способностей. Таким образом, требуемая функция – это результат проявления присущих объекту свойств, которые в свою очередь являются реализованной способностью (потенциальной возможностью) объекта к проявлению все тех же требуемых функций. Отмеченная иерархия понятий дает возможность изначально задумать способность объекта совершать требуемые функции (спроектировать и сконструировать), описать способность количественно как свойство (проанализировать и рассчитать) и реализовать это свойство в виде требуемой функции (изготовить и использовать объект). Если невыполнение любой из требуемых функций считать отказом, то раннее предупреждение возможных отказов становится всего лишь результатом методологического подхода к проектированию (принятию конструкторских решений, их обоснованию, исполнению и контролю). Соответственно и все задачи надежности технических объектов при проектировании и конструировании можно решать на базе инженерных дисциплин и конструкторско-технологических методов обеспечения надежности изделий, причем на самых ранних стадиях жизненного цикла. Для предупреждения отказов в этом случае достаточно использовать принципы физичности (закономерностей причинно-следственных связей) и физической необходимости (непротиворечия законам природы) порождающих их причин.

Модели, необходимые конструктору для понимания надежности. Воспользуемся принципами составления простых математических моделей, с помощью которых можно создать модели функционирования самых сложных технических систем [18]:

- чем проще модель, тем меньше возможность ошибочных выводов;
- модель должна быть простой, но не проще, чем это возможно;
- пренебрегать можно чем угодно, нужно только знать, как это повлияет на решение;
- модель должна быть грубой: малые поправки не должны кардинально менять ее поведение;

- модель и расчет не должны быть точнее исходных данных;

- при анализе результатов исследования модели важны не только конкретные численные результаты, но и понимание, почему и как все происходит, и как это зависит от параметров.

На практике конструктор для достижения целей конструирования использует две модели, которые отражают его представление о реальном объекте и внешней среде, в которой этот объект функционирует:

- информационную модель временных факторов и внешних воздействий на объект по интерфейсам в виде режимов и условий эксплуатации, задаваемых в техническом задании на разработку;

- текстографическую (цифровую) модель, соответствующую стационарной стохастической модели объекта в виде конструкторской (чертежно-технической) документации, которую он в конечном итоге разрабатывает.

Информационная модель временных факторов и внешних воздействий определяет допустимый набор и диапазон значений факторов внешней среды, в которых конструкции надлежит сопротивляться возможным отказам. Особенностью этой модели является то, что при итерационных циклах разработки она, как правило, остается неизменной. Если отказы при эксплуатации происходят из-за того, что некие параметры модели не соответствуют реальности, то к надежности это не имеет никакого отношения (надежность, согласно определению термина, – это свойство, которое проявляется исключительно в изначально заданных режимах и условиях применения). Например, первые спускаемые аппараты автоматических межпланетных станций «Венера» были рассчитаны на давление до 20 атм и были попросту раздавлены в атмосфере планеты, не выполнив до конца поставленных задач, поскольку фактическое давление на поверхности Венеры, как выяснилось позже, составляло около 90 атм (возможно при 20 атм спускаемые аппараты были достаточно надежными, проблема в том, что задача для конструирования была поставлено некорректно). Конструктор любые внешние воздействия изначально рассматривает как детерминированные, не важно из каких соображений они таковыми назначены (это одно из конфликтоопасных различий взглядов конструктора, специалиста по надежности и конечного потребителя).

Стационарная стохастическая модель объекта – это абстрактное описание реальных или гипотетических (еще не изготовленных) изделий, которые могут быть получены в результате многократного изготовления при безусловном соблюдении всех требований в конструкторской документации. Данная модель может итерационно уточняться (изменяться) вплоть до ввода изделия в эксплуатацию, соответственно, стохастическая модель объекта на каждом итерационном шаге изменения технической документации рассматривается как стационарная в состоянии «как она есть». Допуски параметров конструкции в пределах каждого итерационного шага являются неизменными (стационарными),

но значения этих параметров могут меняться случайным (стохастическим) образом в пределах заданных допусков при каждом реальном или гипотетически возможном воплощении, а, следовательно, могут быть осуществлены и развернуты во времени. Таким образом, число гипотетических воспроизведений однородных изделий τ (изготовленных по одной документации, на одном оборудовании, одними специалистами), при котором они способны обеспечить безотказность, является случайной величиной, которая по смыслу не может быть ничем иным, как временем безотказной работы изделия t , выраженным в числе реальных воспроизведений. Указанное свойство стационарной стохастической модели объекта соответствует условию обеспечения надежности в виде $R(t) = P(\tau > t)$ на каждом итерационном шаге изменения технической документации в состоянии «как она есть». Примером практического использования стационарной стохастической модели могут служить расчеты размерных цепей по ГОСТ 16320 вероятностным методом исходя из модели, согласно которой допускается выход замыкающих размеров за пределы поля допуска с обоснованным экономическим риском, и методом максимума-минимума исходя из модели, по которой выход замыкающих размеров за пределы поля допуска не допускается для обеспечения полной взаимозаменяемости.

Функционирование объекта с учетом модели временных факторов и внешних воздействий можно представить в виде двух математических моделей, описывающих выполнение требуемых функций в заданных режимах и условиях применения:

- вероятностно-статистической, когда стационарную стохастическую модель объекта рассматривают как информационную модель в виде черного ящика, реализующую выходные эффекты в зависимости от заданных режимов и условий применения (на основе математической обработки статистической информации о поведении реального объекта или его физических моделей без учета законов природы) (аналог расчета размерных цепей вероятностным методом);

- физической (или, скорее всего, квазифизической, поскольку еще не существует реального объекта), когда стационарную стохастическую модель объекта в заданных режимах и условиях применения представляют в виде системы соответствующих математических уравнений, отражающих совокупность знаний, представлений и гипотез при реализации выходных эффектов на базе физических законов природы (аналог расчета размерных цепей методом максимума-минимума).

Указанные математические модели функционирования соответствуют моделям надежности, которые подразумеваются исходя из функционального и параметрического определения надежности [9]:

- функциональной, когда требуемые функции характеризуют вероятностными показателями отказов (статистическими, логическими, байесовскими, субъективными);
- параметрической, когда требуемые функции представляют в виде набора параметров, характеризующих

способность их выполнения, и допустимых пределов изменения значений этих параметров (параметры являются измеряемыми или расчетными физическими величинами).

При необходимости параметры и вероятностные показатели функционирования объекта могут быть приведены к согласованному безразмерному виду (если параметры можно представить в виде вероятности изменения своих значений в допустимых пределах, по аналогии с пояснениями в ГОСТ 27.002 [1]). Это дает возможность рассматривать функциональную модель надежности как частный случай единой параметрической модели надежности, учитывающей одновременно физическую и статистическую (математическую) природу вещей на основе физической (квазифизической) и вероятностно-статистической моделей [19, 20].

Представленные выше модели позволяют относиться к изделию как к совокупности свойств конструктивных компонентов и элементов, которые должны быть проявлены при выполнении требуемых функций. Такие свойства могут быть задуманы в чертежах отдельно от изделия как способности и реализованы при физическом воплощении изделий с учетом выполнения требуемых функций при изготовлении и применении. Способности и свойства могут быть описаны безразлично как параметрами, так и вероятностными показателями в зависимости от принятых моделей надежности (функциональной или параметрической). Надежность выполнения требуемых функций определяют методом структурной схемы надежности после приведения квазифизической модели функционирования к безразмерному виду, согласованному с вероятностно-статистической моделью. В результате известная модель расчета надежности уникальных и малосерийных объектов по известным показателям надежности компонентов и элементов [1] без потери смыслов заменяется моделью расчета надежности по вероятностям выполнения компонентами и элементами требуемых функций. В этом случае конструктор получает возможность выбирать модель расчета надежности исходя из объективных знаний о природе функционирования изделия (математической или физической), при этом вероятность выполнения изделием любой из своих функций может быть конструктором задумана, реализована и проконтролирована на любой стадии жизненного цикла.

Обобщенная параметрическая модель функционирования изделий. Если изделие рассматривать как структуру, которая в процессе функционирования способна сопротивляться воздействию внешней среды [7], то его можно представить набором выходных параметров (или вероятностных показателей), значения которых определены и ограничены режимами и условиями таких воздействий при заданной наработке. Таким образом, любое изделие можно свести к параметрическому представлению в виде:

- набора выходных параметров, характеризующих требуемые функции для выполнения служебного назначения,

- допустимых значений изменения выходных параметров, определенных режимами и условиями применения;

- наработки, в течение которой значения выходных параметров не будут превышать допустимых ограничений.

Совокупность выходных параметров изделия (или вероятностных показателей), характеризующих наличие и конкретный набор возможностей выполнять требуемые функции, является его **функциональностью**, которую можно выразить в виде

$$X = \{X_1, X_2, \dots, X_i\}, \quad (1)$$

где X – множество выходных параметров X_i , определяющих выполнение требуемых функций.

В качестве выходных могут выступать любые параметры изделия, которые можно соотнести с воздействием внешней среды по критериям «больше-меньше», например:

- прочность как обобщенная характеристика геометрических размеров сечений строительных конструкций и механических свойств конструкционных материалов, противостоящая внешним нагрузкам (несущая способность конструкции должна превышать действующие нагрузки);

- движущий момент на приводе как характеристика энергодостаточности актуатора механизма для преодоления нагрузки в виде момента резистивных сил на пути движения (момент на приводе должен быть выше момента сил сопротивления);

- зазоры в кинематических парах как параметры, противостоящие возможным изменениям во времени размеров сопрягаемых деталей, например, из-за тепловых деформаций (допуски в сопряжении должны быть положительными);

- иные параметры, характеризующие изделие с позиций противостояния заданным внешним нагрузкам и воздействиям (которые могут быть вычислены и измерены).

В процессе функционирования конструкции выходные параметры X_i могут изменять во времени свои значения в допустимых диапазонах, определяемых режимами и условиями применения. Совокупность значений выходных параметров (или вероятностных показателей), при которых изделие способно выполнять требуемые функции, характеризует его **работоспособность** (работоспособное состояние):

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

где D_x – область допустимых значений изменения выходных параметров $X_i(t)$; α_i и β_i – нижняя и верхние границы диапазона изменения значений выходных параметров.

При определении работоспособности (2) производят все необходимые расчеты значений параметров изделия исходя из физических моделей природных явлений и техногенных процессов с учетом ограничений, которые накладывают режимы и условия применения.

Вероятность нахождения во времени значений выходных параметров (или вероятностных показателей) конструкции в допустимой области характеризуют **надежностью** – свойством сохранять во времени вы-

полнение требуемых функций в заданных режимах и условиях применения:

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

где R – надежность объекта как вероятность P нахождения значений выходных параметров $X_i(t)$ в области допустимых значений D_x за время наработки до отказа t_k .

При определении вероятностей (3) путем оценки нахождения значений параметров в допустимых областях при наработке до отказа могут быть использованы два взаимозаменяемых метода [1, 19, 20]:

- детерминированный (путем задания конструктивных запасов по каждому из параметров таким образом, чтобы с определенным доверием гарантировать нахождение значений рассматриваемых параметров в допустимой области);

- стохастический (например, путем оценки конструкционной индивидуальной надежности, суть которой заключается в вычислении вероятностей нахождения параметров в допустимых областях исходя из индивидуальных характеристик материалов, процессов нагружения/воздействия и технологий изготовления изделий).

Совокупность выражений (1) – (3) представляет собой обобщенную параметрическую модель функционирования изделия [20], в которой критерии требуемых функций (выходные параметры и допустимые диапазоны изменения их значений) взаимосвязаны, взаимообусловлены и подчинены целям достижения заданной работоспособности и надежности объекта при выполнении служебного назначения.

Поскольку в основу представленной модели заложен функциональный подход [21], такая модель дает возможность абстрагироваться от конкретного конструктивного исполнения изделий и может использоваться для описания функционирования технических систем различного назначения, например, строительных сооружений, механизмов однократного и многократного срабатывания, электромеханических устройств, электронных сборок, силовых и прецизионных конструкций и т. п. Использование обобщенной параметрической модели функционирования позволяет снять у конструктора когнитивное искажение смысла надежности, поскольку связывает целесообразность проведения всех необходимых расчетов по выбору параметров конструкции с учетом выполнения критериев требуемых функций для обеспечения заданной работоспособности и надежности. Причем надежность в этом случае выступает как работоспособность, развернутая во времени (3).

Указанные модели могут быть решены с помощью методики конструкторско-технологического анализа надежности (КТАН) подробно изложенной в работах [19, 20], которую, не вдаваясь в детали, можно укрупненно свести к выполнению трех процедур анализа:

- инициализации в виде параметризации (превращения изделия в набор параметров или вероятностных показателей и допустимых диапазонов их изменения), которая производится для установления условий (1) – (2);

- подсчетов теоретической надежности по параметрам проектирования, выполняемых согласно (3);

• предоставления доказательств того, что анализ (оценка) надежности соответствует действительности (требованиям конструкторской и технологической документации, условиям осуществления производства, методам контроля качества) [19].

Таким образом, КТАН фактически является дорожной картой для проектирования и конструирования изделий с требуемой надежностью, позволяющей на основе параметрического моделирования выбрать параметры конструкции, обеспечивающие безусловное выполнение требуемых функций, которые на этапе изготовления должны быть выполнены и подтверждены.

Заключение. Используя приведенные в статье понятия, подходы, модели и методы, надежность в представлении конструктора становится работоспособностью, развернутой во времени. Такая надежность всегда конкретна и учитывает все специфические особенности изделия.

Процесс конструирования и обеспечения надежности становится единой и неделимой частью работы при создании изделий независимо от их уникальности, серийности изготовления, наличия или отсутствия показателей надежности компонентов и элементов. Но самое главное, такой подход к надежности, с одной стороны, не противоречит основам современной теории надежности, а, с другой стороны, снимает у конструктора восприятие надежности, как нечто инородное, не связанное с реальной конструкцией.

Библиографический список

1. ГОСТ 27.002–89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. М.: Изд-во стандартов, 1990. 37 с.
2. Рябинин И.А. Академик А.И. Берг и проблемы надежности, живучести и безопасности // Академик Аксель Иванович Берг (К столетию со дня рождения): Сборник статей. М. изд-во Гос. политехн. музея, 1993. С. 6–25.
3. Рябинин И.А. Основы теории и расчета надежности судовых электроэнергетических систем. Л.: Судостроение, 1971. 456 с.
4. Болотин В.В. Применение методов теории вероятности и теории надежности в расчетах сооружений. М.: Стройиздат, 1971. 255 с.
5. Надежность электрорадиоизделий: справочник. М.: Изд-во 22 ЦНИИМО, 2006. 641 с.
6. Половко А.М., Гуров С.В. Основы теории надежности. СПб.: БХВ-Петербург, 2006. 704 с.
7. 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.
8. Веников Г.В. Проектирование и надежность. М.: Знание, 1971. 96 с.
9. Нетес В.А., Тарасьев Ю.И., Шпер В.Л. Как нам определить что такое «надежность» // Надежность. 2014. № 4. С. 3–14.

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

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

12. Похабов Ю.П. Теория и практика обеспечения надежности механических устройств одноразового срабатывания. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2018. 338 с.

13. Хубка В. Теория технических систем. М.: Мир, 1987. 208 с.

14. Уемов А.И. Вещи, свойства и отношения. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 184 с.

15. Большая Советская Энциклопедия. В 30 т. / гл. ред. А.М. Прохоров. М.: Советская энциклопедия, 1970–1978.

16. Толковый словарь русского языка: в 4 т. / под ред. Д. Ушакова. М.: ТЕРРА, 1996.

17. Новейший словарь иностранных слов и выражений. М.: Современный литератор, 2005. 976 с.

18. Неймарк Ю.И. Математические модели в естествознании и технике. Н. Новгород: Изд-во Нижегородского ун-та. Н.И. Лобачевского, 2004. 401 с.

19. 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.

20. 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.

21. Щербаков В.А., Приходько Е.А. Основы финансового функционально-стоимостного анализа. Новосибирск: НГТУ, 2003. 164 с.

Сведения об авторе

Похабов Юрий Павлович – 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

В статье рассмотрены математические модели надежности, которые могут быть решены с применением методики конструкторского-технологического анализа надежности, разработанной автором статьи разработал для анализа и оценки конструкторских решений при проектировании высоконадежных изделий. Статья является развитием идей автора, изложенных в статье «Надежность в цифровых технологиях» (см. журнал «Надежность» №2, 2020).

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.