

Прогнозирование надежности конструкторскими методами

© Ю.П. Похабов

Сибирский федеральный университет, Красноярск, 660041, Российская Федерация

Рассмотрен подход к прогнозированию надежности изделий при отсутствии или неполноте данных об известных показателях надежности составных частей и элементов. Выявлено, что выходом из неопределенности прогнозирования надежности могут служить переосмысление и новая трактовка нормативных документов и научно-методических знаний. Исследованы конструкторские методы прогнозирования надежности за счет обоснования и оценки решений при разработке и изготовлении высокоответственных единичных (уникальных) невозстановливаемых изделий ракетно-космического назначения. Установлено, что любые конструкторские решения можно свести к обоснованию и оценке избыточности «необходимой» структуры изделия по сравнению со «случайностью» внешних факторов. Показано, что при разработке чертежей конструктор способен выбирать параметры и размеры конструкции для достижения требуемой избыточности исходя из частотных, параметрических и логико-вероятностных показателей вероятности изменения состояний изделия. Сделан вывод о том, что для оценки выполнения требуемых функций существует возможность вычислять прогнозную надежность изделия методом расчета надежности по вероятностям выполнения компонентами и элементами требуемых функций.

Ключевые слова: прогнозная надежность, работоспособность, конструирование, технические требования, конструкторская документация, уникальное изделие, параметрическая избыточность

Введение. Согласно существовавшей в царской России традиции, инженеры-мостостроители во время приемочных испытаний становились под новый мост. Например, 28 марта 1897 г. перед первым прогоном четырех сплоченных паровозов по железнодорожному мосту через р. Обь под ним на льду встал основной костяк инженеров с семьями [1]. Таким образом русские инженеры доказывали, что несут персональную ответственность за качество инженерных расчетов, чертежей и изготовления моста.

Пример железнодорожной переправы может служить аллегорией чертежей как своеобразного моста от инженерной мысли к готовому изделию. Графика чертежей является фасадом, за которым скрыты требования к изготовлению. Расчеты элементов конструкции служат основой для выбора конструкционных материалов и установления размеров. При изготовлении обеспечивается точность исполнения требований конструктора. Натурные испытания показывают качество выполненных работ. К слову сказать, мост через р. Обь был демонтирован только в 2000 г., что является показателем его надежности по результатам 103-летних натурных испытаний (эксплуатации).

Поскольку мост — единичное (уникальное) изделие¹, при проектировании надежности которого неприменим ГОСТ Р 27.015–2019, то *целью статьи* является рассмотрение вопроса о том, насколько приемлемы и полезны для конструктора положения современной теории надежности и нормативной документации по надежности для подобных объектов в техническом (как совокупность свойств) и аллегорическом (как образ передачи инженерной мысли) значениях.

Предмет рассмотрения надежности. Начнем с того, что, согласно терминологическому стандарту надежности ГОСТ Р 27.102–2021, объект — это *предмет рассмотрения, на который распространяется терминология в области надежности*. Если обратиться к стандарту системы менеджмента качества ГОСТ Р ИСО 9000–2015, то объект там определяется как *что-то воспринимаемое или воображаемое*. Ни то, ни другое определение объекта не вносит ясности в понимание и обоснование надежности конкретного (*не воображаемого*) моста, состоящего из множества деталей, соединенных в единую уникальную конструкцию, предназначенную для сопротивления силовым, вибрационным, атмосферным, климатическим воздействиям и нагрузкам. Остроты проблеме добавляет тот факт, что при тестовых испытаниях мост способен обрушиться и *восприятие* такого обрушения окажется смертельным не только для строителей и членов их семей (в приведенном выше примере с мостом через р. Обь), но и для паровозных бригад, въехавших на него. Невольно возникает риторический вопрос: а кто бы из современников — разработчиков нынешних стандартов надежности готов был бы встать на лед (с которого некуда убежать) под разработанный и построенный кем-то мост при четырехкратной нагрузке (вспомним четыре паровоза на мосту через реку), даже если они точно будут знать, что установленные ими нормы надежности выполнены?

Порочность термина «объект» в контексте конкретного моста кроется в том, что, согласно нормативному документу по терминологии надежности, его предлагается рассматривать как данность, которая существует сама по себе, без учета закономерностей генезиса надежности, обуславливающего причины возникновения и развития потенциальных отказов. При таком понимании предмета рассмотрения надежности остается неопределенным целый пласт вопросов: изготавливали ли объект «на глаз», по эскизам или по чертежам; проводились ли инженерные расчеты (по каким расчетным схемам, какими методами, с какими исходными данными); в каких условиях производства его изготавливали и монтировали. Мало того, для современной теории надежности все эти вопросы не имеют равным

¹ Единичное (уникальное) изделие — единственное по своей конструкции или по большой редкости и значимости изделие (см. ОСТ 134-1032–2003, ст. 3.1).

счетом никакого значения, поскольку определяющими являются лишь показатели надежности на основе статистики отказов объекта или известные показатели надежности его составных частей и элементов. Ничего подобного при строительстве моста через р. Обь в конце XIX в. не было (впрочем, как и самой надежности в виде инженерной дисциплины).

Выходом из терминологической неопределенности может стать тот факт, что под объектом в числе прочего принято понимать «изделие». Вряд ли имеет смысл рассматривать изделие в терминологии ГОСТ 15895–77 как *единицу промышленной продукции, количество которой может измеряться в штуках (экземплярах)*, поскольку это мало чем отличается от понятия «объект» в терминологическом стандарте надежности. Однако стоит обратить внимание на определение термина «изделие» по ГОСТ 2.101–2016 как *предмета или набора предметов производства, подлежащих изготовлению в организации (на предприятии) по конструкторской документации*, которая, в свою очередь, согласно ГОСТ 2.001–2013, определяется *совокупностью конструкторских документов, содержащих данные, необходимые для проектирования (разработки), изготовления, контроля, приемки, поставки, эксплуатации, ремонта, модернизации, утилизации изделия*. Еще более конкретными определением термина «изделие машиностроения и приборостроения» является ГОСТ 2.114–2016, согласно которому по конструкторской документации выполняются **разработка, изготовление и применение** изделия.

Необходимые данные конструкторской документации, которые должны содержаться в каждом из конструкторских документов, перечислены в ГОСТ 2.102–2013. Конкретно для чертежей такими данными, согласно ГОСТ 2.316–2023, являются **технические требования**, которые включают необходимую и достаточную информацию для изготовления и контроля изделий в виде: *форм, видов, сечений, разрезов, размеров и предельных отклонений, допусков и посадок, погрешностей форм, расположения и шероховатости поверхностей, требований к покупным изделиям, конструкционных материалов (химического состава, вида заготовок, режимов термообработки, защитных покрытий, контроля физико-механических характеристик и т. д.), вспомогательных материалов, конструктивных соединений (крепежных, неразъемных, функциональных), норм прочности, требований и критериев для проведения контрольных испытаний и подобных критериев для исполнения на производстве*. Иными словами, все, что указывается конструктором на поле чертежей, — линии, числа, цифры, буквы, символы (знаки, условные обозначения) — это требования (критерии), которые устанавливаются с единственной целью: чтобы они были безусловно выполнены при изготовлении изделия. Необязательных требований для исполнения

в чертежах не существует, поскольку конструирование основано на принципе обеспечения достаточного минимализма, указанном в одном из требований ГОСТ 2.307–2011: «*Общее количество размеров должно быть **минимальным**, но **достаточным** для изготовления и контроля изделия*». В широком смысле **минимальные** (необходимые) требования обеспечивают качество и надежность изделий, а **достаточные** (исчерпывающие) лимитируют стоимость изготовления изделия.

Из вышеизложенного для дальнейших рассуждений выделим следующие положения:

- под объектом понимается любой искусственный предмет, созданный человеком для расширения возможностей взаимодействия со средой обитания в течение условленного времени, но и под изделием может пониматься тот же самый объект, только изначально созданный по требованиям конструкторской документации, т. е. ***с заранее запланированным и реализованным набором свойств изделия в заданных условиях и ограничениях***;

- любые данные в конструкторской документации — это результат преобразования творческих процессов человеческой мысли и труда в требования чертежа к изготовлению и контролю изделия, установленные и зафиксированные на материальных и электронных носителях информации (т. е. подлежащих исследованию, анализу и расчету), в этом случае для решения задач надежности ***в отличие от объектов по ГОСТ Р 27.102–2021, представленных в совокупности всех своих свойств, могут быть использованы требования чертежа, с помощью которых задают исчерпывающие представления о любом из составных свойств по отдельности или изделии в целом***;

- согласно разъяснениям п. А. 1 справочного приложения ГОСТ Р 27.102–2021, *при необходимости в понятие «объект» могут быть включены информация и ее носители, а конструкторские документы (точнее, требования, содержащиеся в них) являются не чем иным, как информацией на материальных и электронных носителях для изготовления и контроля изделий*.

Таким образом, если предметом рассмотрения надежности становится изделие, изготовленное по конструкторской документации, то о его надежности можно судить, с одной стороны, исходя из обоснования и оценки установленных требований чертежа (почему они такие, а не иные), с другой стороны, исходя из оценки выполнимости условий бездефектного производства (изготовления) по ОСТ 1 41725–78 (с учетом рисков неисполнения требований чертежей). Соответственно, задачи надежности рассматриваются уже применительно не к статистическим правилам теории надежности, а к конструкторским методам обоснования, оценки, установления, выполнения требований к изготовлению и контролю изделий. Это создает основу для выбора таких

решений при разработке и изготовлении изделий, которые влияют на возникновение потенциальных отказов [2]. Возникает новое понимание надежности, определяющее цель работы конструкторов — разработчиков изделий с заданной надежностью: «Любое негативное событие с вероятностью 1:10 или 1:1 000 000 может произойти прямо сейчас, но с разной достоверностью. Задача конструктора — снизить такую достоверность».

Прогнозная надежность. Для снижения достоверности потенциальных отказов конструктор должен обладать ясным пониманием и иметь действенный инструментарий, позволяющий принимать решения для установления требований конструкторской документации к изготовлению и контролю изделия на основании заданных параметров работоспособности и показателей надежности. Тут на сегодня у конструкторов существуют непреодолимые методологические сложности: на уровне нормативной документации параметры работоспособности и показатели надежности предписывается определять несвязанными методами: в одном случае исходя из курса инженерных дисциплин, а в другом — по статистическим правилам теории надежности, что закреплено в ГОСТ 2.118–2013, 2.119–2013 и 2.120–2013. Каким образом с помощью расчета параметров работоспособности конструкции прогнозировать показатели надежности — до сих пор остается нерешенным вопросом. В конструкторской среде это приводит к непониманию того, как именно решения конструктора влияют на показатели надежности, а у специалистов по надежности порождает методы расчета надежности, абстрагированные от конструкторских решений, которые служат основой для установления требований конструкторской документации к изготовлению и контролю изделий.

Методологическая проблема разрешается, если надежность рассматривать одновременно в теории ухудшения структуры изделия (цикла старения) и в теории ее улучшения (цикла развития) [3–5]:

цикл старения — это процессы, охватывающие период времени от сдачи изделия в эксплуатацию до завершения назначенного ресурса или срока службы, что полностью соответствует понятиям современной теории надежности и действующей нормативной документации (особенность цикла старения состоит в том, что невозможно влиять на параметры работоспособности изделия — можно лишь исследовать их изменения статистическими методами);

цикл развития — это процессы, охватывающие период времени от начала разработки до сдачи изделия в эксплуатацию (особенностью цикла развития является возможность влиять на выбор параметров работоспособности вплоть до завершения экспериментальной отработки опытных образцов с выпуском литерной конструкторской документации, откорректированной по результатам испытаний, подтверждающих ее пригодность для соответствующей стадии разработки).

Учет цикла развития надежности дает возможность решить две не решенные до сих пор задачи:

- снизить вероятность отказов в начале эксплуатации при $\Delta t \rightarrow 0$ (в области U-образной кривой надежности, называемой DOA (Dead on Arrival — *англ.*, «мертв по прибытии»)), связанную с причинами, предопределенными до начала эксплуатации, например, ошибками проектирования и конструирования, дефектами производства, нарушениями правил эксплуатации, повреждениями при транспортировке и т. п. [2, 6, 7];

- совместить задачи конструирования, связанные с выбором, обоснованием, оценкой, установлением требований конструкторской документации к изготовлению и контролю изделий, с выполнением требуемых показателей надежности [2].

Указанные задачи надежности решаются путем обеспечения требуемой (либо оптимальной) избыточности «необходимой» структуры изделия по сравнению со «случайностью» внешних факторов [8]. При этом следует иметь в виду, что, согласно терминологии американского военного стандарта MIL-STD-721C, с использованием **избыточных элементов** изделия достигается *продолжительность работы*, а с использованием **неизбыточных элементов** — *вероятность безотказной работы при заданных условиях*. Таким образом, надежность является характеристикой изделия с обоснованной избыточностью или допустимой неизбыточностью (другими словами, минимальной избыточностью).

Основной проблемой конструирования является расхождение между требуемой (обоснованной или минимальной) избыточностью конструкции и действительной, обусловленной **техническими требованиями** конструкторской документации к изготовлению и контролю изделия. В этой связи следует исходить из того, что степень избыточности напрямую связана с вероятностью безотказной работой конкретными математическими зависимостями, например, при расчетах на прочность заданная вероятность неразрушения соответствует определенным, строго обоснованным значениям коэффициентов безопасности и запасов прочности [9, 10]. **Коэффициент безопасности** — это расчетный коэффициент, определяемый как отношение расчетных и действительных значений внешних нагрузок. Внешние расчетные нагрузки используют для вычисления внутренних нагрузок в конструкции, исходя из значения которых определяют необходимые механические характеристики конструкционных материалов и размеры конструктивных элементов для обеспечения требуемой вероятности неразрушения изделия. **Запас прочности** относится к механическим напряжениям в конструктивных элементах и определяет разницу между допускаемыми и предельными напряжениями для исключения разрушения в случае необходимости обеспечить

дополнительную локальную надежность элементов конструкции. Таким образом, коэффициент безопасности относится к понятию случайности внешних факторов, запас прочности — к понятию необходимой структуры изделия, а вместе они направлены на снижение вероятности неразрушения конструкции.

Аналогичный подход к обеспечению избыточности конструкции заложен в понятие запасов движущих моментов (сил) при выборе характеристик приводов раскрытия для преодоления сопротивления движению в подвижных механических узлах космических аппаратов [11], а также любых иных параметров физических систем, которые подчиняются модели отказов по схеме «нагрузка — сопротивление» [12]. Во всех случаях, когда конструктор способен сопоставить значения параметров с их предельными значениями по критерию «больше — меньше», он имеет возможность обосновать выбор и выполнить оценку своих решений при разработке конструкции изделия. При этом величина **параметрической избыточности** будет соответствовать показателю надежности, который определяется как вероятность невыхода значений параметров конструкции за пределы **расчетных диапазонов нагружения и воздействия**, установленных конструктором с учетом заданной вероятности неразрушения [2, 3]. Например, если конструктор определяет размеры силовых элементов конструкции исходя из ограничений по прочности конструкционных материалов, то принцип параметрической избыточности заключается в том, чтобы значения допустимых напряжений с учетом установленных размеров силовых элементов конструкции были меньше предельных напряжений в конструкционных материалах, причем разница между предельными и допустимыми напряжениями будет определять требуемый запас надежности [13]. Таким образом, детерминированные и вероятностные методы расчета на прочность являются взаимозаменяемыми, причем *установление коэффициентов безопасности и запасов прочности не исключает отказов за счет утяжеления изделия, а, напротив, допускает отказы исходя из требуемых значений надежности и массы конструкции* [12]. Например, коэффициенты безопасности в ракетно-космической технике, согласно ГОСТ Р 56514–2015, рекомендуется назначать исходя из вероятности неразрушения не менее 0,99995, т. е. коэффициенты безопасности определяют так, чтобы масса конструкции с запасом прочности, равным единице, соответствовала надежности неразрушения не ниже 0,99995.

Принцип **параметрической избыточности** применяется в случае невозможности или нецелесообразности использования резервирования (дублирования или троирования) критичных элементов, например, для любого элемента конструкции изделия, который по условию функционирования может быть только один — в частности, для оси вращения любого из механизмов. Вместе с тем у конструктора

существуют другие способы повышения избыточности изделия. Так, при разработке электрических, электронных и электрорадиотехнических систем избыточность обеспечивается за счет резервирования отдельных элементов и системы в целом, при этом степень резервирования можно рассматривать как аналог запаса прочности механических систем **в действительных (рабочих) диапазонах нагружения и воздействия** [14] (важное уточнение: с коэффициентом безопасности, равным единице — *примеч. авт.*). Чтобы обеспечить заданную надежность электрорадиотехнических систем, необходимо знать известные показатели надежности компонентов и элементов и в случае недостаточной надежности использовать способы резервирования согласно Р 50-54-82–84 (фактически увеличивая их «запас прочности»). Сложности возникают лишь в том случае, когда показатели надежности, например, электрорадиотехнических компонентов и элементов изделия неизвестны, а их статистическая наработка невозможна. В этом случае проводят испытания по ГОСТ Р МЭК 61508-7–2012 методом FI (Fault Injection) путем заведомого *внесения неисправностей* в аппаратные средства системы и документирования реакций системы с вычислением и оценкой среднего времени наработки на отказ (при необходимости проводятся модификация системы и повторение испытаний до достижения требуемых показателей надежности) [15].

В случае конструирования технических систем, в которых функционирование критичных элементов подчиняется законам алгебры логики, используют математические или компьютерные способы моделирования, выявляющие условия достижения работоспособных состояний. При этом в случае установления и строгого исполнения требований технической документации, согласованных с предписанными условиями осуществления логико-вероятностных процедур, результаты *правильности* моделирования и достижения *работоспособности* реальной конструкции в конечном итоге с большой долей вероятности будут тождественны (понятие правильности как *реализации заданных процессов в соответствии с предусмотренными алгоритмами их выполнения* принято согласно работе [16]). В данном случае аналогом **избыточности** могут выступать планирование, обоснование и исполнение необходимого и достаточного перечня организационно-технических мероприятий, позволяющих обеспечить достижение истинных состояний реальной системы (например, выполнение процедур особо ответственных операций по ГОСТ Р 57945–2017).

Таким образом, при разработке чертежей конструктор способен выбирать параметры и размеры конструкции для достижения требуемой избыточности исходя из частотных, параметрических и логико-вероятностных показателей вероятности выполнения составными частями изделия требуемых функций. Для оценки выполнения требуемых функций существует **возможность** вычислять *прогнозную надежность*

изделия методом расчета надежности по вероятностям выполнения компонентами и элементами требуемых функций [17]. При условии соблюдения бездефектного изготовления по ОСТ 1 41725–78 и эксплуатации согласно установленным требованиям эксплуатационной документации прогнозная надежность может в полной мере соответствовать надежности реального изделия. Смысловое отличие прогнозной надежности от надежности, определенной с помощью статистических правил теории надежности, заключается в том, что прогнозная надежность на основе установленной конструктором избыточности (*конструктивных запасов*) дает возможность варьировать параметры изделия на этапе разработки для управления потенциальными отказами [18]. При этом не изменяется понятие термина «прогнозирование надежности» согласно ГОСТ Р 27.102–2021 — как *определение оценки показателя надежности объекта на основании предшествующего опыта или путем экстраполяции на другую продолжительность эксплуатации и другие условия эксплуатации*.

В любом случае без обоснования и оценки *прогнозной надежности как вероятности выполнения требуемых функций* обеспечение допустимой надежности, *как математической вероятности реализации событий* невозможно, если только не проводить оценку надежности формально или просто вписывать в отчеты нужное количество девяток (а дальше жизнь рассудит, угадали или нет, поскольку вероятность — она и есть вероятность [19]). При этом методы исследования и обеспечения надежности статистическими методами не изменяют своего значения, если в этом есть объективная необходимость — например, при длительной эксплуатации восстанавливаемых систем как основы планирования, организации и проведения ремонтов и технического обслуживания.

Прогнозирование надежности как основа конструирования. Для промышленного типа практической деятельности конструирование является основой существования производства [20]. Соответственно, проблемы надежности при конструировании должны определяться не констатацией статистического уровня надежности изделия, когда-либо уже отработавшего свой ресурс, а ее прогнозированием исходя из возможного поведения изделия в заданных условиях применения, технологического обеспечения показателей качества, отработочных испытаний и регламентации условий эксплуатации, что способно стать основой управления надежностью и обеспечения ее требуемого уровня [21]. Таким образом, прогнозирование надежности в первую очередь становится прерогативой конструктора и должно осуществляться конструкторскими, а не математическими, методами обоснования и оценки надежности [2]. Если признать тот факт, что надежность является осознанным результатом целенаправленной конструкторской деятельности, а не набором случайных событий и действий в надежде

получить требуемый результат, то *при разработке изделий следует исходить не из физических дефектов изделий, способных привести к отказам, а из ошибок, совершаемых человеком при их создании* [20, 22, 23]. Вероятно, именно такой взгляд на проблемы надежности за рубежом привел к смещению фокуса внимания разработчиков изделий при обеспечении их надежности на совершенствование правил проектирования (конструирования), что отражено в нормативных и литературных источниках. Приведем примеры:

«...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 Чарльза Харлана (Charles Harlan), руководителя по безопасности и надежности космической программы Space Shuttle [24]).

Иными словами, на практике значительно важнее относиться к надежности как к результату использования установленной и упорядоченной верификационной конструкторской деятельности, чем к стремлению любой ценой получить достоверную информацию о частоте отказов. Верификационная деятельность должна базироваться на установлении обоснованных требований к изготовлению и эксплуатации изделий в нормативно-технической и рабочей технической документации, а обеспечение надежности становится в этом случае следствием результатов выполнения и контроля таких требований [25, 26].

Заключение. Прогнозирование надежности конструкторскими методами приводится на основе физических законов и закономерностей с использованием конструкторско-технологических способов разработки и производства изделий. В первую очередь это важно для высокоответственных единичных (уникальных) изделий при отсутствии или неполноте данных об известных показателях надежности их составных частей. При прогнозировании надежности конструкторскими методами статистическая надежность становится частным случаем понимания надежности, когда инженеры не способны моделировать физические процессы и явления, протекающие в изделиях,

например в электрорадиоизделиях на уровне внутренних механических, тепловых и электрических процессов.

При создании высокоответственных единичных (уникальных) изделий положения современной теории надежности и нормативной документации по надежности в целом не препятствует использованию конструкторских методов прогнозирования надежности. При необходимости и целесообразности к любым готовым изделиям (единичным либо серийным) могут быть применимы нормы статистической надежности, если это оправдано и обосновано финансово-экономическими соображениями. Однако только прогнозирование надежности конструкторскими методами дает возможность перекинуть аллегорический мост от конструкторского замысла к готовому изделию с заданной надежностью путем обоснования его требуемых свойств.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Мысик П.Ф., Александров Н.А. *Стальная магистраль: летопись Западно-Сибирской железной дороги*. Новосибирск, Историческое наследие Сибири, 2015, 568 с.
- [2] Похабов Ю.П. *Обоснование и оценка решений при разработке высокоответственных механизмов одноразового срабатывания*. Красноярск, Сиб. федер. ун-т, 2025, 224 с.
- [3] Кузнецов А.А. *Надежность конструкции баллистических ракет*. Москва, Машиностроение, 1978, 256 с.
- [4] Панченков А.Н. *Энтропия*. Нижний Новгород, Интелсервис, 1999, 589 с.
- [5] Сергеев А.М., Бондур В.Г., глав. ред. *Вклад Академии наук в освоение Космоса*. Москва, РАН, 2021, 348 с.
- [6] Похабов Ю.П., Валишевский О.К. Генезис надежности уникальных высокоответственных систем. *Надежность*, 2016, т. 16, № 3, с. 47–53. DOI: 10.21683/1729-2646-2016-16-3-47-53
- [7] Jackson C. *Small Satellites, Emerging Technology and Big Opportunities: The Reliability of New, Awesome Things*. Bowker, 2018, 120 p.
- [8] Веников Г.В. *Проектирование и надежность*. Москва, Знание, 1971, 96 с.
- [9] Арасланов А.М. *Расчет элементов конструкций заданной надежности при случайных воздействиях*. Москва, Машиностроение, 1987, 128 с.
- [10] Похабов Ю.П., Шендалев Д.О., Колобов А.Ю., Наговицин В.Н., Иванов Е.А. К вопросу установления коэффициентов безопасности и запасов прочности при заданной вероятности неразрушения силовых конструкций. *Сибирский аэрокосмический журнал*, 2021, т. 22, № 1, с. 166–176.
- [11] Похабов Ю.П. О необходимости запасов движущих моментов (сил) в подвижных узлах раскрывающихся конструкций. *Вестник машиностроения*, 2020, № 2, с. 29–33.
- [12] 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.
- [13] Dhillon B.S., Singh C. *Engineering reliability*. Hoboken, New Jersey, USA, John Wiley & Sons, 1981, 339 p.

- [14] Филин А.В. Самосинхронизация — естественный путь обеспечения долгоживучести интегральных схем. *Системы и средства информатики*, 1999, вып. 9, с. 242–246.
- [15] Панков А.П., Панков Д.А., Похабов Ю.П., Панков И.А. Перспективы использования FMEA-анализов для высокоответственных технических систем. *Известия ТулГУ. Сер. Технические науки*, 2024, вып. 3, с. 26–31. DOI: 10.24412/2071-6168-2024-3-26-27
- [16] Шубинский И.Б. *Функциональная надежность информационных систем. Методы анализа*. Москва, Журнал «Надежность», 2012, 296 с.
- [17] Похабов Ю.П. Надежность: взгляд конструктора. *Надежность*, 2020, т. 20, № 4, с. 13–20. DOI: 10.21683/1729-2646-2020-20-4-13-20
- [18] Похабов Ю.П. Надежность в цифровых технологиях. *Надежность*, 2020, т. 20, № 2, с. 3–11. DOI: 10.21683/1729-2646-2020-20-2-3-11
- [19] О процессе проектирования космической техники в НПО им. С.А. Лавочкина (Открытое письмо Сергею Борисовичу Иванову. За восемь месяцев до запуска АМС «Фобос-Грунт»). Электронный бюллетень новостей. *Космический дайджест*, 2013, № 20, с. 4, 5.
- [20] Похабов Ю.П. Некоторые выводы по результатам применения конструкторско-технологического анализа надежности для изделий ракетно-космического назначения. Часть 1. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2023, вып. 8. DOI: 10.18698/2308-6033-2023-8-2297
- [21] Проникиев А.С. *Надежность машин*. Москва, Машиностроение, 1978, 592 с.
- [22] Reason J. *Human Error*. Cambridge, University Press, 1990, 302 p.
- [23] Похабов Ю.П. О надежности изделий ракетно-космического назначения, содержащих компоненты и элементы с неизвестными показателями надежности. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2024, вып. 6. DOI: 10.18698/2308-6033-2024-6-2363
- [24] Лернер Э.Дж. Альтернатива «запуску на авось». *Аэрокосмическая техника*, 1987, № 9, с. 157–160.
- [25] Севастьянов Н.Н., Андреев А.И. *Основы управления надежностью космических аппаратов с длительными сроками эксплуатации*. Томск, ТГУ, 2015, 266 с.
- [26] Севастьянов Н.Н. Управление надежностью космических аппаратов с длительными сроками эксплуатации. *Космонавтика и ракетостроение*, 2017, № 3, с. 133–148.

Статья поступила в редакцию 02.04.2026

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Похабов Ю.П. Прогнозирование надежности конструкторскими методами. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2026, вып. 8. EDN DTIQGX

Похабов Юрий Павлович — канд. техн. наук, доцент межинститутской базовой кафедры «Прикладная физика и космические технологии», Сибирский федеральный университет. e-mail: pokhabov_yury@mail.ru

Reliability Prediction Using Design Methods

© Yu.P. Pokhabov

Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education
“Siberian Federal University”, Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation

An approach to predicting the reliability of engineering products in the absence of, or with incomplete, reliability data for their components and elements is considered. It is shown that the uncertainty associated with reliability prediction can be overcome through a reinterpretation of regulatory documents and established scientific and methodological principles. Design methods for reliability prediction are investigated based on the substantiation and evaluation of engineering solutions adopted during the development and manufacture of highly critical, one-of-a-kind (unique), non-repairable aerospace products. It is established that any design solution can be reduced to the substantiation and assessment of the redundancy between the required product structure and random environmental factors. It is demonstrated that, during the preparation of design documentation, the design engineer is able to select the structural parameters and dimensions required to achieve the specified level of redundancy on the basis of frequency-based, parametric, and logical-probabilistic indicators characterizing the probability of changes in the product state. It is concluded that compliance with the required functional performance can be assessed by predicting product reliability using a reliability calculation method based on the probabilities of the required functions being performed by individual components and elements.

Keywords: reliability prediction, operability, engineering design, technical requirements, design documentation, unique product, parametric redundancy

REFERENCES

- [1] Mysik P.F., Aleksandrov N.A. *Stalnaya magistral: letopis Zapadno-Sibirskoy zheleznoy dorogi* [Steel Mainline: A Chronicle of the West Siberian Railway]. Novosibirsk, Istoricheskoe nasledie Sibiri Publ., 2015, 568 p.
- [2] Pokhabov Yu.P. *Obosnovanie i otsenka resheniy pri razrabotke vysokootvetstvennykh mekhanizmov odnorazovogo srbatyvaniya* [Substantiation and Evaluation of Engineering Decisions in the Development of Highly Critical Single-Use Mechanisms]. Krasnoyarsk, Siberian Federal University Publ., 2025, 224 p.
- [3] Kuznetsov A.A. *Nadezhnost konstruktii ballisticheskikh raket* [Reliability of Ballistic Missile Structures]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1978, 256 p.
- [4] Panchenkov A.N. *Entropiya* [Entropy]. Nizhny Novgorod, Intelservis Publ., 1999, 589 p.
- [5] Sergeev A.M., Bondur V.G., eds. *Vklad Akademii nauk v osvoenie Kosmosa* [The Contribution of the Academy of Sciences to Space Exploration]. Moscow, Russian Academy of Sciences Publ., 2021, 348 p.
- [6] Pokhabov Yu.P., Valishevskiy O.K. Genesis nadezhnosti unikalnykh vysokootvetstvennykh sistem [Genesis of the Reliability of Unique Highly Critical Systems]. *Nadezhnost — Dependability*, 2016, vol. 16, no. 3, pp. 47–53. DOI: 10.21683/1729-2646-2016-16-3-47-53
- [7] Jackson C. *Small Satellites, Emerging Technology and Big Opportunities: The Reliability of New, Awesome Things*. New Providence, NJ, R.R. Bowker, 2018, 120 p.

-
- [8] Venikov G.V. *Proektirovanie i nadezhnost* [Design and Reliability]. Moscow, Znanie Publ., 1971, 96 p.
 - [9] Araslanov A.M. *Raschet elementov konstruktsey zadannoy nadezhnosti pri sluchaynykh vozdeystviyakh* [Design Calculation of Structural Elements with a Specified Reliability under Random Loads]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1987, 128 p.
 - [10] Pokhabov Yu.P., Shendalev D.O., Kolobov A.Yu., et al. K voprosu ustanovleniya koeffitsientov bezopasnosti i zapasov prochnosti pri zadannoy veroyatnosti nerazrusheniya silovykh konstruktsey [On the Determination of Safety Factors and Strength Margins for a Specified Probability of Non-Failure of Load-Bearing Structures]. *Sibirskiy aerokosmicheskiy zhurnal — Siberian Aerospace Journal*, 2021, vol. 22, no. 1, pp. 166–176.
 - [11] Pokhabov Yu.P. O neobkhodimosti zapasov dvizhuschikh momentov (sil) v podvizhnykh uzlakh raskryvayushchikhsya konstruktsey [On the Need for Torque (Force) Margins in the Moving Joints of Deployable Structures]. *Vestnik mashinostroeniya*, 2020, no. 2, pp. 29–33.
 - [12] Timashev S.A., Pokhabov Yu.P. *Problemy kompleksnogo analiza i otsenki individualnoy konstruksionnoy nadezhnosti kosmicheskikh apparatov (na primere povorotnykh konstruktsey)* [Problems of Comprehensive Analysis and Assessment of the Individual Structural Reliability of Spacecraft (A Case Study of Deployable Structures)]. Yekaterinburg, AMB Publ., 2018, 38 p.
 - [13] Dhillon B.S., Singh C. *Engineering Reliability*. New York, John Wiley & Sons, 1981, 339 p.
 - [14] Filin A.V. Samosinkhronizatsiya — estestvennyy put obespecheniya dolgozhivuchesti integralnykh skhem [Self-Synchronization as a Natural Way to Ensure the Long-Term Reliability of Integrated Circuits]. *Sistemy i sredstva informatiki — Systems and Means of Informatics*, 1999, iss. 9, pp. 242–246.
 - [15] Pankov A.P., Pankov D.A., Pokhabov Yu.P., et al. Perspektivy ispolzovaniya FMEA-analizov dlya vysokootvetstvennykh tekhnicheskikh sistem [Prospects for the Application of FMEA Analysis to Highly Critical Engineering Systems]. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki*, 2024, iss. 3, pp. 26–31. DOI: 10.24412/2071-6168-2024-3-26-27.
 - [16] Shubinsky I.B. *Funktsionalnaya nadezhnost informatsionnykh sistem* [Functional Reliability of Information Systems]. Moscow, Nadezhnost Publ., 2012, 296 p.
 - [17] Pokhabov Yu.P. Nadezhnost': vzglyad konstruktora [Dependability from a designer's standpoint]. *Nadezhnost — Dependability*, 2020, vol. 20, no. 4, pp. 13–20. DOI: 10.21683/1729-2646-2020-20-4-13-20
 - [18] Pokhabov Yu.P. Nadezhnost v tsifrovyykh tekhnologiyakh [Dependability in digital technology]. *Nadezhnost — Dependability*, 2020, vol. 20, no. 2, pp. 3–11. DOI: 10.21683/1729-2646-2020-20-2-3-11
 - [19] O protsesse proektirovaniya kosmicheskoy tekhniki v NPO im. S.A. Lavochkina (Otkrytoe pis'mo Sergeyu Borisovichu Ivanovu. Za vosem mesyatsev do zapuska AMS «Fobos-Grunt») [On the Process of Space Technology Design at S.A. Lavochkin Association (An Open Letter to Sergey Borisovich Ivanov. Eight Months before the Launch of the Phobos-Grunt Interplanetary Mission)]. *Elektronnyy byulleten novostey. Kosmicheskiy daydzhest*, 2013, no. 20, pp. 4–5.
 - [20] Pokhabov Yu.P. Nekotorye vyvody po rezultatam primeneniya konstruktorskotekhnologicheskogo analiza nadezhnosti dlya izdeliy raketno-kosmicheskogo naznacheniya. Chast' 1 [Some Conclusions from the Application of Design-and-Technological Reliability Analysis to Rocket and Space Hardware. Part 1]. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2023, iss. 8. DOI: 10.18698/2308-6033-2023-8-2297
-

- [21] Pronikov A.S. *Nadezhnost mashin* [Machine Reliability]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1978, 592 p.
- [22] Reason J. *Human Error*. Cambridge, Cambridge University Press, 1990, 302 p.
- [23] Pokhabov Yu.P. O nadezhnosti izdeliy raketno-kosmicheskogo naznacheniya, soderzhashchikh komponenty i elementy s neizvestnymi pokazatelyami nadezhnosti [On the Reliability of Rocket and Space Products Containing Components and Elements with Unknown Reliability Parameters]. *Inzhenerny zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2024, iss. 6. DOI: 10.18698/2308-6033-2024-6-2363
- [24] Lerner E.J. An Alternative to “Launching on a Wing and a Prayer” [In Russ.: Lerner E.Dzh. Alternativa «zapusku na avos». *Aerokosmicheskaya tekhnika — Aerospace Technology*, 1987, no. 9, pp. 157–160].
- [25] Sevastyanov N.N., Andreev A.I. *Osnovy upravleniya nadezhnostiyu kosmicheskikh apparatov s dlitelnymi srokami ekspluatatsii* [Fundamentals of Reliability Management for Spacecraft with Long Operational Lifetimes]. Tomsk, Tomsk State University Press, 2015, 266 p.
- [26] Sevast’yanov N.N. Upravlenie nadezhnostyu kosmicheskikh apparatov s dlitelnymi srokami ekspluatatsii [Reliability Management of Spacecraft with Long Operational Lifetimes]. *Kosmonavtika i raketostroenie*, 2017, no. 3, pp. 133–148.

Pokhabov Yu.P., Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor of the Inter-Institute Basic Department “Applied Physics and Space Technologies”, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education “Siberian Federal University”.

e-mail: pokhabov_yury@mail.ru