

О надежности изделий ракетно-космического назначения, содержащих компоненты и элементы с неизвестными показателями надежности

© Ю.П. Похабов

АО «НПО ПМ — Малое Конструкторское Бюро», Железногорск,
Красноярский край, 662972, Российская Федерация

Помимо электронной компонентной базы с известными показателями надежности, изделия ракетно-космического назначения нередко содержат конструкции и устройства с неизвестными показателями надежности компонентов и элементов. Для обоснования и контроля надежности таких изделий чаще всего нецелесообразно или невозможно нарабатывать показатели надежности на основе правил статистической надежности. Подтверждение и контроль надежности изделий, содержащих компоненты и элементы с неизвестными показателями надежности, можно осуществлять, только изменив подходы к ее пониманию. Рассмотрены различные аспекты надежности: терминологические, инженерные, экономические и управленческие. Выявлено, что надежность изделий, содержащих компоненты и элементы с неизвестными показателями, можно обеспечить только решениями и действиями конструкторов, обусловленными знаниями, опытом, квалификацией, компетенциями и здравым смыслом. Контроль надежности изделий осуществляется в два этапа. На ранних стадиях жизненного цикла подтверждаются конструкторские решения с помощью анализов на основе установленных конструктивных запасов (резервирования, запасов работоспособности, использования организационно-технических приемов, исключающих отказы, обеспечения процедур получения гарантированных результатов) с учетом худших случаев состояния изготовления, режимов и условий применения (например, с помощью конструкторско-технологического анализа надежности). На заключительной стадии проводят экспериментальную отработку изделий для подтверждения достоверности результатов выполненных конструкторских анализов.

Ключевые слова: изделия ракетно-космического назначения, надежность, отказ, работоспособность, конструктивные запасы, конструкторско-технологический анализ надежности

Введение. Ненадежные технические объекты целенаправленно никто не создает. Для того чтобы обеспечить требуемые параметры работоспособности и показатели надежности, проводят анализы работоспособности и безотказности, инженерные расчеты, экспериментальную отработку, мероприятия по обеспечению условий бездефектного производства, контрольные и приемочные испытания при изготовлении и тому подобные конструкторские и технологические процедуры, исключающие или смягчающие риски возможных отказов. Однако для подтверждения и контроля заданных показателей надежности согласно требованиям нормативно-технических документов необходимо знать результаты статистических испытаний объектов

или использовать известные показатели надежности их компонентов и элементов.

В то же время остаются до сих пор неразрешенные вопросы, связанные с обоснованием и контролем показателей надежности сложных технических объектов, главным образом, ракетно-космического назначения, содержащих компоненты и элементы с неизвестными показателями надежности. К таким объектам относятся:

- невосстанавливаемые объекты одноразового использования (например, одноразового или однократного срабатывания, единичного производства, а также иные объекты, для которых неприменимы правила статистической теории надежности);

- уникальные высокоответственные объекты, для которых наработка статистических показателей надежности может не согласовываться со здравым смыслом и финансово-экономическими затратами на их создание (например, при недостатке информации о генеральной совокупности);

- объекты, работающие в экстремальных условиях, когда наработка показателей надежности может оказаться невозможной по причине сложности обеспечения стохастически однородных условий проведения статистических испытаний (например, при применении крупногабаритных объектов в условиях внешней среды, резко отличающихся от наземных: глубоко под водой или под землей, при повышенной радиации, в космическом пространстве и т. п.);

- уникальные высокоответственные объекты одноразового срабатывания, работающие в экстремальных условиях, подтверждение показателей надежности которых может оказаться нерешаемой организационно-технической задачей (например, конструкции автоматических космических аппаратов, которые автономно развертываются в автоматическом режиме на орбитах небесных тел или в дальнем космосе на поверхности планет назначения).

Несмотря на сложности контроля надежности таких объектов, их установленный уровень надежности необходимо как-то подтверждать. О том, как именно подтверждать показатели надежности объектов, содержащих компоненты и элементы с неизвестными показателями надежности, до сих пор не появилось единого понимания.

Особенности моделирования надежности. Согласно терминологическому определению, используемому во всех отечественных стандартах, надежность — это свойство объекта. В то же время одно из основных свойств надежности — безотказность — определяют вероятностью безотказной работы, которая указывает на возможность возникновения отказа в пределах заданной наработки объекта. Таким образом, надежность как физическое свойство объекта определяют вероятностью возникновения событий — отказов, которые к надежности

как к физическому свойству объекта не имеют отношения, поскольку служат лишь фактом проявления ненадежности без учета причинно-следственной связи, вызвавшей его появление.

В результате, не имея физической модели надежности как процесса сохранения параметров объекта в результате изменения внутреннего состояния при внешнем воздействии, используют математическую модель для прогноза наступления событий на основе гипотетических закономерностей поведения готовых объектов с учетом накопленной статистической информации о возможных отказах. Таким образом, вместо математической модели надежности, описывающей причины отказов физических объектов, используют математическую модель ненадежности в виде нарушения функционирования физических объектов — отказов, не связанных с причинами их возникновения.

Для решения вопросов моделирования надежности объектов, содержащих компоненты и элементы с неизвестными показателями надежности, представляется целесообразным использовать термины «изделие» вместо — «объект». Причина в том, что согласно терминологическому определению по ГОСТ Р 2.005–2023, «изделие — это предмет или набор предметов производства, подлежащих изготовлению в организации по конструкторской документации», в то время как объект с точки зрения надежности — это предмет, который исследуют без учета истории его происхождения (генезиса). Такой подход дает возможность любое изделие представить в виде набора необходимых и достаточных требований к изготовлению и эксплуатации, установленных в конструкторской документации. Наличие такого набора данных об изделии позволяет моделировать его поведение в заданных режимах и условиях применения на основе физических законов и закономерностей, в отличие от объектов, моделирование которых можно проводить только вероятностно-статистическими методами.

Для реализации подхода к надежности технических объектов, содержащих компоненты и элементы с неизвестными показателями надежности, можно использовать подход к надежности в контексте применения термина «изделие» как предмета, создаваемого с изначально заданным набором требований согласно конструкторской документации.

Надежность как инженерная задача. В соответствии с принятой терминологией надежности объект и изделие могут в равной мере рассматриваться как *предмет рассмотрения, на который распространяется терминология в области надежности*, и следовательно, должны выполнять во времени все требуемые функции в заданных режимах и условиях применения. В контексте термина «изделие» это означает, что, во-первых, свойства материалов и сама конструкция

еще до начала изготовления должны быть известны и обладать требуемой степенью избыточности по отношению к внешним воздействиям, во-вторых, такая степень избыточности не должна быть критически нарушена при изготовлении и эксплуатации.

Согласно ГОСТ 33707–2016, избыточность при обеспечении надежности изделия определяется как *наличие средств повышения надежности в дополнение к основному набору средств для выполнения требуемой функции*. При этом *способ обеспечения надежности объекта за счет использования дополнительных средств и/или возможностей, сверх минимально необходимых для выполнения требуемых функций*, по ГОСТ Р 27.102–2021 называют резервированием. В соответствии с рекомендациями Р 50-54-82-88 резервирование заключается в *применении дополнительных средств и возможностей для сохранения работоспособности объекта (или изделия, — примеч. Ю.П.) при отказе одного или нескольких его элементов или нарушением связей между ними*. Различают пять основных видов резервирования: структурное, временное, функциональное, информационное, нагрузочное.

С точки зрения надежности сложных технических изделий, содержащих компоненты и элементы с неизвестными показателями надежности, необходимо использовать термин «точка единичного отказа», который согласно ГОСТ РО 1410-001–2009 и ГОСТ Р 56526–2015 определяют как *элемент, в конструкции которого не предусмотрено резервирования*.

В точках единичного отказа необходимо применять параметрическую избыточность нерезервируемых элементов в виде расширения области их работоспособного состояния за счет создания запасов работоспособности: прочности, движущих моментов (сил) подвижных узлов в механизмах, износостойкости трибологических систем (увеличение допусков на износ, увеличение площади опорных поверхностей, применение износостойких материалов и др.) и т. п. [1]. Значения запасов работоспособности устанавливают исходя из правил статистической теории надежности (например, коэффициенты безопасности и запасы прочности) [2] или подтвержденной практики применения (например, запасы движущих моментов (сил) подвижных узлов в механизмах) [3]. Если невозможно применять запасы работоспособности, для точек единичного отказа используют конструктивные приемы, направленные на снятие ограничений по изменению выходных параметров изделий (например, путем использования силовых и температурных развязок) [4]; выполнение организационно-технических мероприятий, снижающих либо исключаяющих вероятность возникновения отказов (например, выполнения «наиболее сложных (ответственных) операций» по ГОСТ Р 56526–2015); обеспечение

процедур получения гарантированных результатов, например, с применением минимаксных критериев либо использованием факторов инженерной психологии [5].

Избыточность любого конструктивного элемента изделия (с резервированием или без) определяют путем установления требований в конструкторской документации для изготовления и эксплуатации с учетом конструктивных запасов — условий и ограничений, позволяющих при любых значениях параметров конструкции изделия обеспечить работоспособное состояние в заданных режимах и условиях применения с приемлемыми рисками отказов.

Решение задач конструирования изделий с приемлемыми рисками отказов заключается в том, чтобы:

- выбрать и обосновать значения всех параметров критичных элементов конструкции с учетом конструктивных запасов;
- установить необходимые и достаточные требования в конструкторской документации для изготовления и эксплуатации;
- обеспечить контролепригодность и определить критерии контроля ключевых характеристик изделия.

Задачей изготовления изделий с допустимыми рисками отказов является безоговорочное выполнение условий бездефектного производства [6].

С позиций конструктора, обеспечение надежности, связанной со статистическими показателями, является абстрактной задачей, не содержащей данных для принятия конструкторских решений. В то же время надежность как гарантоспособность (основанная на обеспечении гарантий высокой надежности конструкции за счет исключения или снижения потенциальных отказов) позволяет конструктору принимать необходимые решения и осуществлять достаточные действия по обоснованию требуемых параметров работоспособного состояния и заданных показателей надежности изделия [7]. В этом случае обеспечение надежности проводят путем обоснования значений параметров критичных элементов, установления конструктивных запасов (резервирования, запасов работоспособности, использования организационно-технических приемов, исключающих отказы) и контроля выполнения требований к изготовлению и эксплуатации на каждом из этапов жизненного цикла изделия.

Надежность как экономическая категория. Функционирование изделий при эксплуатации связано с эффективностью выполнения задач служебного назначения, а вероятность их выполнения определяет финансово-экономические и безопасностные показатели применения и обслуживания [8]. Для этих целей организация внутренней структуры и устройства изделий не представляет сколь-либо существенного значения, но становятся необходимы вероятностно-статистические

показатели его надежности для прогнозирования жизнедеятельности изделия при эксплуатации. С точки зрения решения экономических задач возможны два подхода к подтверждению надежности изделий:

- для ремонтпригодных изделий серийного производства — обеспечение и контроль надежности согласно нормативным документам на основе статистических правил теории надежности для планирования технического обслуживания и ремонтов, накопления требуемых номенклатуры и объемов запасных частей и материалов, организации сервисного обслуживания покупных изделий и т. п.;

- для неремонтпригодных изделий одноразового использования серийного производства (программно-отказная бытовая техника) — обеспечение и контроль надежности согласно нормативным документам на основе статистических правил теории надежности с включением в изделие неравнопрочных конструктивных элементов с пониженным (или повышенным) ресурсом функционирования, обеспечивающим гарантийный срок эксплуатации с заданной вероятностью.

Для подхода к подтверждению надежности изделий, содержащих компоненты и элементы с неизвестными показателями надежности, например для неремонтпригодных изделий одноразового использования единичного производства (высокоответственных, одноразовых или уникальных), существует единственный вариант — обеспечение гарантоспособного функционирования изделия конструкторскими методами с контролем регламентов конструкторской деятельности на каждой из стадий жизненного цикла.

Экономическая эффективность создания изделий, содержащих компоненты и элементы с неизвестными показателями надежности, достигается за счет переноса фокуса внимания разработчиков с готового изделия, когда уже сложно и дорого исправлять ошибки, на достижение требуемых параметров конструкции изделия на начальных стадиях его разработки. В этом случае экономически оправданным становится направлять все усилия и ресурсы заинтересованных лиц на разработку и соблюдение стандартов, регламентов и методик конструирования с учетом обеспечения условий:

- безошибочного проектирования — обоснованного выбора принципов работоспособности и подтверждения инженерных решений для достижения заданной надежности [9];

- бездефектного проектирования — соблюдения общепринятых принципов, правил, требований, норм, нормалей и стандартов, включая единую систему конструкторской документации [10];

- бездефектного производства — строгого выполнения требований чертежа (работы без листков изменений чертежей) [6].

Надежность как экономическая категория при изготовлении, например, неремонтпригодных изделий одноразового использования единичного производства определяется не рисками возможных

потерь (они по определению не предполагаются), а безусловным выполнением условий конструирования и изготовления для гарантированного достижения поставленных задач. В данном случае следует научиться разумно сочетать задачи статистической наработки показателей надежности компонентов и элементов (если это возможно и экономически обосновано) с разработкой и применением методологии принятия конструктором обоснованных решений для достижения работоспособного состояния и требуемой надежности однородных изделий, составляющих сложную техническую систему (силовых конструкций, механизмов, электромеханических узлов, пиротехнических устройств, электрорадиоизделий и иных составных частей).

Надежность как часть менеджмента. Согласно руководству к своду знаний по управлению проектами РМВОК (далее — руководство РМВОК) [11], обеспечение надежности является не чем иным, как проектом по созданию одного из результатов инженерной деятельности (внутри проекта по созданию изделия). В этом случае обеспечение надежности является не кампанейщиной, не единичным однажды достигнутым результатом, а системной деятельностью, правила которой не могут изменяться ситуативно в зависимости от чьих-либо интересов. Выполнение проекта включает пять групп стандартизованных процессов: начало (инициация), планирование, исполнение, контроль и закрытие. Каждый из процессов в руководстве РМВОК детально формализован и остается неизменным по составу, и с этих позиций проект под названием «обеспечение надежности» однородных изделий не является исключением.

В качестве примера инициации проекта по обеспечению надежности используем следующий тезис: *«Надежность предоставления услуги стала определяться надежностью не одного аппарата, а всей спутниковой группировки, которая может содержать несколько сотен, иногда тысяч спутников. И выход из строя одного, пяти, десяти уже не критичен. Это принципиально другой подход. Но для этого нужно изменить производственную модель — выпускать спутники серийно, пополнять группировку»* [12].

С позиций руководства РМВОК, инициация проекта под названием «обеспечение надежности» по снижению надежности космических аппаратов содержит два допущения:

- надежность многоспутниковой космической системы должна обеспечиваться не на уровне отдельно взятого космического аппарата, а на уровне орбитальной группировки, т. е. количеством одновременно функционирующих аппаратов;
- снижение надежности космических аппаратов дает возможность перехода к использованию «некосмических» комплектующих изделий для производства составных частей платформ и полезных нагрузок космических аппаратов.

Исходя из указанных допущений, может быть сделан вывод, что переход к использованию «некосмических» комплектующих изделий приведет к снижению сроков и стоимости разработки космических аппаратов. Однако с позиций руководства РМВОК любые допущения при инициации — это один из основных источников рисков невыполнения задач проекта. При переходе от надежных космических аппаратов к надежным орбитальным группировкам можно допустить два подхода к обеспечению надежности космических аппаратов: снижать их надежность до минимально возможного контролируемого уровня или же изготавливать с ненормированной надежностью (подразумевая ее снижение).

Изготовление космических аппаратов с минимально возможным контролируемым уровнем надежности ничего не меняет в процессах реализации проекта под названием «обеспечение надежности»: процедуры выполнения проектно-конструкторских работ остаются неизменными, условия бездефектного производства не нарушаются, требования к контрольным операциям не снижаются и т. п. Меняется лишь уровень надежности комплектующих изделий — он снижается, но остается контролируемым. При обеспечении надежности орбитальной группировки из ненадежных космических аппаратов действует принцип фон Неймана — *синтез надежных машин из ненадежных элементов* [13]. В данном случае в качестве ненадежных элементов выступают космические аппараты. Найти в таком решении экономическую целесообразность достаточно сложно, поскольку эффективность решения задач синтеза надежных систем из ненадежных элементов повышается при снижении уровня иерархии, на котором проводится синтез. Вывод о снижении сроков и стоимости разработки космических аппаратов с пониженной надежностью в конечном итоге скорее всего окажется неверным — аппаратов для создания орбитальной группировки понадобится значительно больше, при этом появляется негативный фактор — замусоривание околоземного пространства неработающими спутниками.

Второй возможный подход к обеспечению надежности — изготовление космических аппаратов с ненормированной надежностью может оказаться и вовсе катастрофичным. Директивное понижение уровня требований к надежности космических аппаратов дает повод и соблазн резко снизить требования к контролю качества и надежности комплектующих изделий, уровню проектно-конструкторских работ и расчетно-экспериментальной отработки, условиям осуществления бездефектного производства, требованиям к проведению контрольных и приемочных испытаний и т. д. Всего того, что позволяет подчинить изготовление спутников декларируемой задаче — делать их быстро и дешево. Не хочется думать о последствиях, хотя негатив от такого подхода может оказаться не таким уж надуманным

на фоне того, что становятся обыденными факты изготовления и контроля качества изделий «по памяти», без чертежей, при массовых нарушениях условий бездефектного производства, принятия решений о доработках дефектов изготовления без участия конструкторов (чтобы «начальство не огорчать»), подчинения организации производства выполнению сроков и показателей КРІ руководителей всех уровней управления и других подобных явлений.

В современном инженерном сообществе последствия снижения требований к качеству и надежности изделий только усугубляют отраслевые тенденции по резкому снижению уровня базового образования инженеров, практически полной ликвидации наставничества на предприятиях, ослаблению научно-методического потенциала, непродуманной практики цифровизации проектирования (утрата старой инженерной школы и некритическое отношение к компьютерным вычислениям), что в конечном итоге несет риски потерь компетенций проектных организаций. Здесь же можно отметить жизненную закономерность: на одном предприятии невозможно иметь одновременно две системы менеджмента надежности — для надежных и ненадежных космических аппаратов. В результате всегда будет что-то одно, причем в худшем варианте.

Надежность как сфера деятельности, основанная на знании точных наук. Философия надежности любых изделий основывается на примате решений и действий конструкторов исходя из их знаний, опыта, квалификации, компетенций и здравого смысла, которые в конечном итоге определяют результат проектирования и конструирования. Всегда более важно выявлять и по возможности смягчить последствия видов отказов проектно-конструкторскими методами, нежели, несмотря ни на что, стремиться получить знания о вероятностях проявления отказов. Логика проектирования и конструирования изделий простая: ложные идеи порождают неправильные чертежи, неправильные чертежи — негодную продукцию, негодная продукция — отсутствие требуемого результата проектно-конструкторских работ.

Технологическая подготовка, изготовление, проведение контрольных операций, эксплуатация — все эти процедуры подчинены безусловному выполнению решений и действий конструктора.

Создание высоконадежных изделий, содержащих компоненты и элементы с неизвестными показателями надежности, требует изменения подходов к конструированию для достижения заданных требований надежности. На сегодняшний день такому подходу препятствуют требования стандартов по надежности, основанные на правилах статистической теории надежности. К этому следует добавить слабое развитие методологической базы конструирования, в лучшем случае ограниченной в рамках конструкторских школ крупных проектно-конструкторских организаций.

Одним из подходов при создании высоконадежных изделий, содержащих компоненты и элементы с неизвестными показателями надежности, представляется отношение к надежности как к *сфере конструкторской и производственной деятельности, основанной на знании точных наук*. Любые решения при создании изделий на основе статистических подходов теории надежности могут (и должны) рассматриваться как частный случай инженерной деятельности, обусловленный недостатком имеющихся знаний о физических основах функционирования составных частей изделия на уровне еще не изученных процессов и явлений.

Заключение. В качестве подтверждения и контроля надежности изделий ракетно-космического назначения, содержащих компоненты и элементы с неизвестными показателями надежности, необходимо развивать и использовать инженерные анализы конструкторских решений по обоснованию работоспособности и надежности. Для этого необходимо культивировать «знания формул» из курса инженерных дисциплин, конструкторско-технологические способы обеспечения качества и надежности и использовать алгоритмизированные процедуры проведения анализа (например, *конструкторско-технологического анализа надежности* [9]).

Контроль надежности изделий ракетно-космического назначения, содержащих компоненты и элементы с неизвестными показателями надежности, осуществляется в два этапа. На ранних стадиях жизненного цикла — подтверждают конструкторские решения с помощью анализов на основе установленных конструктивных запасов (резервирования, запасов работоспособности, использования организационно-технических приемов, исключающих отказы, обеспечения процедур получения гарантированных результатов) с учетом худших случаев состояния изготовления, режимов и условий применения. На заключительной стадии проводят экспериментальную отработку изделий для подтверждения достоверности результатов выполненных конструкторских анализов.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Гусев А.М., Романчев И.В. Резервирование пути повышения надежности систем. *Труды Международного симпозиума «Надежность и качество»*, 2009, т. 2, с. 186–187.
- [2] Похабов Ю.П., Шендалев Д.О., Колобов А.Ю. и др. К вопросу установления коэффициентов безопасности и запасов прочности при заданной вероятности неразрушения силовых конструкций. *Сибирский аэрокосмический журнал*, 2021, т. 22, № 1, с. 166–176.
- [3] Золотов А.А., Похабов Ю.П., Гусев Е.В. Обеспечение проектной надёжности раскрывающихся конструкций космических аппаратов. *Общероссийский научно-технический журнал «Полёт»*, 2018, № 7, с. 36–45.
- [4] Поляк В.С., Бервалдс Э.Я. *Прецизионные конструкции зеркальных радиотелескопов*. Рига, Зинатне, 1990, 526 с.

- [5] Шишмарев В.Ю. *Надежность технических систем*. Москва, Изд. центр «Академия», 2010, 304 с.
- [6] Сейфи И.Ф., Ярошенко А.И., Бакаев В.И. *Система КАНАРСПИ. Гарантия высокого качества*. Москва, Изд-во стандартов, 1968, 149 с.
- [7] Паронджанов В.Д. *Как улучшить работу ума: Алгоритмы без программистов — это очень просто!* Москва, Дело, 2001, 360 с.
- [8] Ллойд Д.К., Липов М. *Надёжность: организация исследования, методы, математический аппарат*. Москва, Советское радио, 1964, 686 с.
- [9] Похабов Ю.П., Точилов Л.С. Пути проектирования надежной отечественной ракетно-космической техники в изменяющихся условиях. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2022, вып. 6. [dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2022-6-2184](https://doi.org/10.18698/2308-6033-2022-6-2184)
- [10] Горохова В.В. *Применение Саратовской системы при проведении исследовательских и конструкторских работ*. Москва, Изд-во стандартов, 1969, 105 с.
- [11] *Руководство к своду знаний по управлению проектами* (Руководство РМВОК). 5-е изд. Project Management Institute, Inc., 2013, 614 с.
- [12] 250 спутников в год [Из интервью с Ю.И. Борисовым, размещенным на сайте goscocosmos.ru]. *Сибирский спутник*, 2023, № 5, с. 4.
- [13] Нейман Дж. *Вероятностная логика и синтез надежных организмов из ненадежных компонент*. Сб. *Автоматы*. К.Э. Шеннон, Дж. Маккарти, ред. Москва, Изд-во ин. лит-ры, 1956, с. 68–139.

Статья поступила в редакцию 22.04.2024

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

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. EDN UNSVYM

Похабов Юрий Павлович — канд. техн. наук, главный специалист, АО «НПО ПМ МКБ». e-mail: pokhabov_yury@mail.ru

On the reliability of rocket and space products containing components and elements with unknown reliability indicators

© Yu.P. Pokhabov

JSC “NPO PM MKB”, Zheleznogorsk, Krasnoyarsk Territory,
662972, Russian Federation

In addition to an electronic component base with the known reliability indicators, rocket and space products often contain structures and devices with the unknown reliability indicators of their components and elements. To justify and control reliability of such products, it is most often impractical or impossible to develop the reliability indicators based on the statistical reliability rules. Reliability confirmation and control of products containing components and elements with the unknown reliability indicators could be performed only by changing approaches to understanding the reliability. The paper considers various aspects of reliability: terminological, engineering, economic and management. It shows that reliability of products containing components and elements with the unknown indicators could only be ensured by the designer decisions and actions based on knowledge, experience, qualifications, competencies and common sense. Product reliability control is introduced in two stages. At the life cycle early stage, design decisions are confirmed using analysis based on the established design reserves (redundancy, performance reserves, use of organizational and technical methods that exclude failures, ensure procedures for obtaining the guaranteed results) taking into account the worst cases of manufacture, operation modes and conditions (for example, using the reliability design and technological analysis). At the final stage, the product is experimentally tested to confirm reliability of the design analysis results.

Keywords: rocket and space products, reliability, failure, dependability, design reserves, reliability design and technological analysis

REFERENCES

- [1] Gusev A.M., Romanchev I.V. Rezervirovanie puti povysheniya nadezhnosti system [Redundancy of ways to increase the system reliability]. In: *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma “Nadezhnost i kachestvo”* [Works of International symposium “Reliability and Quality”], 2009, vol. 2, pp. 186–187.
- [2] Pokhabov Yu.P., Shendalev D.O., Kolobov A.Yu. et al. K voprosu ustanovleniya koeffitsientov bezopasnosti i zapasov prochnosti pri zadannoy veroyatnosti nerazrusheniya silovykh konstruktsiy [To the question of establishing safety coefficient and assurance coefficient at a given probability of non-destruction of load-bearing structures]. *Sibirskiy aerokosmicheskoy zhurnal — The Siberian Aerospace Journal*, 2021, vol. 22, no. 1, pp. 166–176.
- [3] Zolotov A.A., Pokhabov Yu.P., Gusev E.V. Obespechenie proektnoy nadezhnosti raskryvayushchikhsya konstruktsiy kosmicheskikh apparatov [Ensuring design reliability of the deployable spacecraft structures]. *Obshcherossiyskiy nauchno-tekhnicheskoy zhurnal “Polet” — All-Russian Scientific-Technical Journal “Polyot” (“Flight”)*, 2018, no. 7, pp. 36–45.
- [4] Polyak V.S., Bervalds E.Ya. *Pretsizionnye konstruktsii zerkalnykh radioteleskopov* [Precision designs of the reflecting radio telescopes]. Riga, Zinatne Publ., 1990, 526 p.
- [5] Shishmarev V.Yu. *Nadezhnost tekhnicheskikh sistem* [Reliability of the technical systems]. Moscow, Akademiya Publ., 2010, 304 p.

- [6] Seifi I.F., Yaroshenko A.I., Bakaev V.I. *Sistema KANARSPI. Garantiya vysokogo kachestva* [CANARSPI system. High quality guaranteed]. Moscow, Standarty Publ., 1968, 149 p.
- [7] Parondzanov V.D. *Kak uluchshit rabotu uma: Algoritmy bez programmistov – eto ochen prosto!* [How to improve your mind: Algorithms without programmers – it's very simple!]. Moscow, Delo Publ., 2001, 360 p.
- [8] Lloyd D.K., Lipov M. *Nadezhnost: organizatsiya issledovaniya, metody, matematicheskiy apparat* [Reliability: organization of research, methods, mathematical apparatus]. Moscow, Sov. Radio Publ., 1964, 686 p.
- [9] Pokhabov Yu.P., Tochilov L.S. Puti proektirovaniya nadezhnoy otechestvennoy raketno-kosmicheskoy tekhniki v izmenyayushchikhsya usloviyakh [Approaches to designing reliable domestic rocket and space equipment under changing conditions]. *Inzhenerny zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2022, iss. 6. <https://doi.org/10.18698/2308-6033-2022-6-2184>
- [10] Gorokhova V.V. *Primeneniye Saratovskoy sistemy pri provedenii issledovatel'skikh i konstruktorskiykh rabot* [Application of the Saratov system in research and development work]. Moscow, Standarty Publ., 1969, 105 p.
- [11] *A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK Guide)*. Fifth edition. Project Management Institute, Inc., 2013, 614 p. [In Russ.: Rukovodstvo k svodu znaniy po upravleniya proektami (Rukovodstvo PMBOK)].
- [12] 250 sputnikov v god (Iz intervyyu s Yu.I. Borisovym, razmeshchennym na sayte roscosmos.ru) [250 satellites per year [from an interview with Yu.I. Borisov posted on the roscosmos.ru website]. *Sibirskiy sputnik — Siberian satellite*, 2023, no. 5, p. 4.
- [13] Neumann J. *Veroyatnostnaya logika i sintez nadezhnykh organizmov iz nenadezhnykh komponent. Sb. Avtomaty* [Probabilistic logic and the synthesis of reliable organisms from unreliable components. In: Automata Studies]. K.E. Shannon, J. McCarthy, eds. Moscow, Inostrannoy Lit-ry Publ., 1956, pp. 68–139.

Pokhabov Yu.P., Cand. Sc. (Eng.), Chief Specialist, JSC “NPO PM MKB”, Zheleznogorsk, Krasnoyarsk Territory, Russian Federation.
e-mail: pokhabov_yury@mail.ru