

Некоторые выводы, сделанные по результатам применения конструкторско-технологического анализа надежности для изделий ракетно-космического назначения. Часть 3

© Ю.П. Похабов

АО «НПО ПМ — МКБ», Железногорск, Красноярский край,
662972, Российская Федерация

Представлен анализ причин несоответствия ожидаемых и реальных результатов проектирования механизмов одноразового срабатывания для обоснования их работоспособности и надежности функционирования. Показано, что в основе этих характеристик на всех этапах жизненного цикла механизмов лежит гарантоспособная деятельность конструктора. Отмечено, что важнейшими составляющими такой деятельности являются знания, опыт, квалификация, компетенции и здравый смысл конструктора, которые он может не только накопить эволюционным путем, но и получить посредством итерационного применения проводимого по установленному алгоритму конструкторско-технологического анализа надежности, позволяющего максимально эффективно и быстро нарастить уровень конструкторских разработок организаций. Установлено, что для высокоответственных механизмов одноразового срабатывания следует обязательно проводить такой анализ надежности, чтобы уменьшить разницу между ожидаемыми и реальными результатами проектирования.

Ключевые слова: конструкторско-технологический анализ надежности (КТАН), изделия ракетно-космического назначения, надежность, отказ, ошибки, гарантоспособность

Введение. Применение конструкторско-технологического анализа надежности (КТАН) при разработке изделий ракетно-космического назначения привело к непредвиденному результату. Выяснилось, что конструкторская документация нередко содержит конструкторско-технологические ошибки, которые несут риски отказов тогда, когда изделие прошло полный цикл штатной расчетно-экспериментальной отработки и даже летную квалификацию [1–3]. Этот факт сам по себе непримечателен, если не принимать во внимание, что анализировалась документация различных конструкторских организаций, занимающихся разработкой механизмов одноразового срабатывания (далее — механизмов) летательных аппаратов (ЛА). Для таких механизмов ценной любой ошибки может стать частичный отказ или гибель ЛА, в стоимости которых на отказавший механизм приходится ничтожная удельная доля. Именно поэтому к подобным механизмам предъявляются повышенные требования безотказности — не ниже 0,999–0,9999, так что их надежность оказывается значительно выше, чем у остального бортового оборудования [4].

Несмотря на высокие требования к безотказности, результаты исследования орбитальных отказов космических аппаратов (КА) показывают, что фактическая безотказность раскрытия механизмов может составлять по разным оценкам от 0,989 до 0,996 [1]. Однако следует отметить, что этот результат существенно завышен из-за неполной статистики отказов. Тем не менее даже такой показатель будет ниже заданных требований на один-два порядка, хотя ошибки инженерных расчетов не должны превышать 5...10 %. Ввиду незначительного ресурса наработки физико-механические свойства материалов механизмов на момент срабатывания практически не подвергаются деградации вследствие накопления усталостных повреждений, износа, коррозии, старения, охрупчивания и других подобных явлений. Следовательно, причинами отказов механизмов главным образом являются дефекты (ошибки) проектирования, что подтверждается выводами зарубежных исследователей, согласно которым доля конструкторских ошибок при отказах доходит до 60 % и выше от общего числа ошибок, приводящих к авариям КА [5, 6]. С учетом достигнутого на практике уровня [1] показатель безотказности, равный 0,999, для современных механизмов, скорее всего, следует считать пределом, который при существующем уровне проведения проектно-конструкторских работ, изготовления и наземной экспериментальной отработки вряд ли будет превышен. Однако применение КТАН в дополнение к имеющимся инструментам достижения работоспособности и надежности позволяет надеяться, что уровень безотказности механизмов вполне может преодолеть отметку в 0,999.

Цель данной работы — на основе результатов применения методики КТАН выявить причины несоответствия ожидаемых и реальных результатов проектирования механизмов для обоснования работоспособности и надежности функционирования, что может быть полезным конструкторам при проектировании изделий ракетно-космической техники.

Предпосылки для разработки КТАН. Приведем несколько цитат, авторы которых подчеркивают необходимость упорядочения и алгоритмизации конструкторской деятельности:

• *В проблеме надежности нет важных и неважных вещей. Не все ли равно, из-за чего остановится блюминг, мартен или доменная печь?* [А.И. Берг, 7];

• *Повысить надежность техники в процессе эксплуатации нельзя. Ее можно только обеспечить и поддерживать на необходимом уровне* [А.М. Половко, С.В. Гуров, 8];

• *Чем дальше от доски конструктора обнаруживается ненадежность, тем дороже она обходится* [А.Н. Туполев, 9];

• *Хорошо спроектированная и качественно изготовленная, детально и всесторонне испытанная до начала эксплуатации и правильно*

эксплуатируемая машина в течение всего периода эксплуатации должна работать без каких-либо остановок [В.В. Шашкин, Г.П. Карзов, 10].

Из приведенных высказываний следует, что надежность обуславливается в основном решениями и действиями конструкторов, а также точностью исполнения установленных ими требований, определяющих порядок организации и проведения отработочных и контрольных испытаний, технологической подготовки, изготовления, технического контроля и эксплуатации. Можно, конечно, не обращать внимания на требования конструктора при изготовлении и эксплуатации, например, работать по памяти, без чертежей, но к повышению надежности это наверняка не приведет.

Для обеспечения заданных показателей надежности в конструкторской документации (прежде всего, в чертежах и спецификациях) должны быть установлены необходимые и достаточные требования к изготовлению и эксплуатации изделия, которые надлежащим образом обоснованы и подтверждены расчетно-экспериментальной отработкой. Обоснование и подтверждение таких требований осуществляются путем выявления параметров критичных элементов и обеспечения нахождения значений этих параметров в допустимом диапазоне состояний при заданных режимах и условиях эксплуатации с учетом конструктивных запасов (в частных случаях — запасов работоспособности). В дальнейшем при изготовлении необходимо контролировать значения параметров критичных элементов по заданным критериям, установленным в конструкторской документации, и выполнять условия бездефектного производства.

Решения и действия конструктора могут быть верифицированы с помощью формализованных процедур КТАН [11]:

- декомпозиции конструкции на основе анализа функциональности — выявления совокупности свойств, определяемых наличием и набором возможностей выполнять требуемые функции;
- определения работоспособности — состояния, в которых конструкция способна выполнять требуемые функции;
- обоснования надежности — свойства конструкции сохранять во времени выполнение требуемых функций в заданных режимах и условиях эксплуатации;
- проверки соответствия проектных параметров требованиям конструкторской и технологической документации;
- оценки рисков невыполнения условий бездефектного производства;
- корректировки расчета надежности с учетом влияния мероприятий по предупреждению отказов.

Алгоритм проведения КТАН основан на традициях советских школ инженерии и надежности, что отличает данный анализ от

западных процедур верификации разработок, например FMEA-анализов [12]. При использовании КТАН всем критичным элементам конструкции придают такие свойства, чтобы при установленной избыточности структуры их отказы в заданных режимах и условиях применения стали невозможными. В этом случае безотказность (буквально, работа без отказов) или управление отказами достигается последовательными действиями по выбору, обоснованию, обеспечению и контролю искомых свойств критичных элементов. Для инженерии не существует особых сложностей с определением таких свойств, и при этом не нужны какие-либо эксперты (не посвященные в конструкторский замысел) для их выявления, кроме знания конструктором законов и закономерностей физики, инженерных дисциплин и конструкторско-технологических способов обеспечения качества и надежности. Например, чтобы обеспечить свойство прочности, необходимо, исходя из действующих нагрузок, выбрать конструкционный материал с требуемыми физико-механическими характеристиками и геометрические размеры сечений и габаритов силовых элементов изделия. Для того чтобы обеспечить свойство электрорадиотехнических систем по передаче электросигналов, необходимо с учетом требуемых режимов работы системы выбрать элементную базу электрорадиоизделий с требуемыми показателями надежности, синтезировать из таких изделий электрорадиотехническую систему с заданной надежностью, определить сечения токоведущих частей и способы их соединения, а также провести установленный объем контрольных испытаний. Все требования по обеспечению свойств критичных элементов должны быть заданы в конструкторской документации, выполнены на производстве и проконтролированы службами технического контроля.

Процедуры КТАН основаны на том, что любую конструкторскую документацию можно представить в виде набора свойств критичных элементов, описываемых параметрами, которые могут быть измерены с достаточной степенью достоверности и использованы для управления (регулирования) работоспособностью и надежностью в процессе производства, а риски нахождения значений параметров в заданном диапазоне могут быть определены инженерным расчетом. При этом установленные свойства критичных элементов конструкции можно представить в виде набора требований к изготовлению и эксплуатации.

Основы безошибочного конструирования. Методология конструирования никогда не была достоянием неограниченного круга людей из-за приватности процедур разработки изделий, нередко являющихся производственными секретами. Тем не менее выработаны формализованные методы конструирования, позволяющие существенно систематизировать процесс разработки. Одна из общеизвестных

процедур конструирования — соблюдение внешней атрибутики, т. е. выполнение норм и требований ЕСКД. Использование нормативных документов помогает сократить число ошибок на производстве, связанных с решениями и действиями конструкторов и восприятием третьими лицами требований, предъявляемых при изготовлении и эксплуатации.

Однако ЕСКД сама по себе не способна исключить возможность совершать конструкторские ошибки. Требуются формализованные процедуры принятия конструктором обоснованных решений и действий при разработке документации. Одна из этих формализованных процедур — так называемые правила проектирования и конструирования, т. е. набор требований к конструкции при разработке однородных групп изделий, выбор и исполнение которых в итоге определяют их работоспособность и надежность. Эти правила чаще всего не бывают общедоступными для широкого круга специалистов, так как они вырабатываются в изолированной узкопрофессиональной среде. Кроме того, по разным причинам эти требования не систематизируют и не публикуют, зачастую они остаются местечковым инженерным фольклором, из поколения в поколение их передают как накопленный жизненный опыт. Однако в редких случаях перечни таких правил попадают в общедоступную научно-техническую литературу.

Для космических механизмов известны два перечня правил разработки механизмов — российский [1] и американский [13]. Существуют также аналогичные перечни, применяемые к радиоэлектронным средствам [14], программному обеспечению [15] и приборам [16]. Сам по себе факт существования таких правил в разных областях техники подтверждает необходимость их разработки независимо от типа проектируемых изделий.

Для разработки правил проектирования и конструирования требуется в течение длительного времени работать с однородными изделиями, что в быстроизменяющихся условиях создания современной техники делает их наработку практически невыполнимым занятием. Тем не менее в конструкторской деятельности можно выделить однотипные процедуры, дающие ключ к их формулированию и формализации. В частности, разработка конструкторской документации является прежде всего процедурой выбора и обоснования конструктором своих решений и действий, предназначенных для того, чтобы установить необходимые и достаточные требования конструкторской документации к изготовлению и эксплуатации изделий, подлежащих безусловному выполнению. Конструктор на производстве является центральной фигурой — он разрабатывает конструкторскую документацию с учетом технологических возможностей производства, устанавливает требования к изготовлению, а производство организовано так,

что требования конструкторов должны безусловно выполняться. При этом деятельность конструктора подчиняется решению комплекса следующих вопросов:

- выполнению цели и задач разработки изделия;
- использованию адекватных математических моделей для выбора и обоснования физико-механических свойств изделия в заданных режимах и условиях внешних воздействий;
- оценке влияния факторов технологической наследственности на работоспособность и надежность;
- обеспечению релевантности значений параметров изделия требованиям конструкторской документации;
- соблюдению контролепригодности критичных параметров и установлению необходимых контрольных проверок и испытаний;
- выполнению условий бездефектного производства.

Решение конструктором указанных вопросов может быть сведено к матрице компетенций и выбора им средств для решения профессиональных задач, приведенной в таблице.

Матрица компетенций и выбора средств для решения задач

<i>Решения и действия</i>			
Выбор принципов работы и обоснование способности конструкции выполнять требуемые функции	Обоснование значений параметров конструкции для обеспечения работоспособности и надежности	Установление необходимых и достаточных требований конструкторской документации для изготовления и эксплуатации	Обеспечение выполнимости и контролепригодности требований конструкторской документации
<i>Моделирование</i>			
Параметрическое — определение набора необходимых и достаточных параметров, обеспечивающих работоспособность и надежность	Инженерное — применение набора математических моделей и методов проверки значений параметров	Информационное — установление перечня и набора необходимых и достаточных требований к изготовлению и эксплуатации	Натурное — выполнение и подтверждение требований конструкторской документации
<i>Верификация</i>			
Аналитическая — инженерные анализы (обоснование решений и действий)	Расчетная — инженерные расчеты (мысленные эксперименты)	Экспериментальная — наземная экспериментальная отработка (стендовые испытания)	Зачетная — летная квалификация (натурные испытания)

Использование различных методов моделирования и верификации позволяет конструктору устранять или смягчать возможные ошибки, связанные с тем, что при разработке конструкторской документа-

ции могут быть приняты ложные решения, вызванные следующими причинами:

- неучтенными факторами режимов и условий эксплуатации;
- невыявленными параметрами критичных элементов, влияющими на работоспособность и надежность;
- необоснованными методиками и недостаточными объемами расчетов;
- неустановленными требованиями конструкторской документации.

Фактически в процессе своей деятельности конструктор переводит свои знания и понимание о работе конструируемого им изделия в обоснованные требования к изготовлению и эксплуатации, а также назначает необходимый объем контрольных параметров, проверок и испытаний, которые должны быть неукоснительно выполнены при изготовлении. Тем не менее ошибки на практике происходят и иногда приводят к недопустимым авариям и инцидентам с ничем не оправданными потерями и издержками, хотя очевидно, что проектировать дорогостоящие и высокоответственные технические объекты с ошибочными действиями людей безответственно и недопустимо [17].

Гарантоспособная деятельность конструктора. В конце 1970-х годов под руководством А. Авижиениса была разработана терминология надежности применительно к анализу вычислительной техники [18]. Термин *Dependability*, определение которого предложил А. Авижиенис, в русскоязычной среде [19–21] получил новое звучание — **гарантоспособность** (предоставление гарантии высокой надежности и защищенности от сбоев) в значении *свойства вычислительной системы, позволяющего обоснованно полагаться на выполнение услуг, для которых она предназначена* [19].

В 2001 г. В.Д. Паронджанов обратил внимание на многозначность определения термина «гарантоспособность», приведенного в работе [19]. Если под вычислительной системой понимать любую систему с участием человека типа субъект–объект, то термин **гарантоспособность** можно определить как *свойство эргатической системы, позволяющее обоснованно полагаться на выполнение задач, для которых она предназначена* [17].

Под эргатической понимается система взаимодействия человека с результатом его труда — техническими средствами производства [22]. Применительно к конструированию эргатическая система включает совокупность взаимосвязанных элементов, позволяющих обеспечить гарантоспособную деятельность конструктора при разработке конструкторской документации, в частности:

- конструктора с его знаниями, опытом, квалификацией, компетенциями и здравым смыслом;
- внешнего окружения, связанного с конструктором деловыми отношениями;

- профессиональными особенностями деятельности конструктора, а именно, предметом (разрабатываемой конструкторской документацией), средствами (экономическими ресурсами, необходимыми для создания предмета труда) и условиями (факторами производственной среды и трудового процесса, оказывающими влияние на эффективность работы конструктора).

Применительно к надежности как свойству технического объекта гарантоспособная деятельность конструктора — это набор решений и действий, позволяющих обоснованно полагаться на достижение заданной надежности. Согласно современным взглядам, гарантоспособная деятельность конструктора не связана научно-обоснованными подходами с положениями современной теории надежности, а надежность рассматривается сама по себе, без учета своего происхождения и развития (генезиса). Например, современные методы расчета надежности применяют *в предположении, что в начальный момент эксплуатации автоматический КА находится в работоспособном состоянии* [23, Приложение В], т. е. работоспособность рассматривается как данность, а не результат чьих-то целенаправленных решений и действий. В реальности только благодаря гарантоспособной деятельности конструктора технический объект в конечном итоге (после изготовления) способен обрести свойство функционировать без отказов (при условии обеспечения бездефектного производства). Введение термина гарантоспособность [17–21] применительно к конструированию позволяет разделить понятия надежности в виде:

- *физического свойства*, присущего объекту для функционирования без отказов в результате его создания;

- *меры надежности* объекта как математической величины, характеризующей степень проявления его физического свойства надежности.

Результат понятийного разделения надежности на гарантоспособность и собственно надежность — обособленные, но взаимосвязанные сферы инженерной деятельности:

- методы обоснования решений и действий конструктора при переработке информации в процессе интеллектуального труда, направленные на получение результата гарантоспособной деятельности конструктора — конструкторской документации для изготовления и эксплуатации технического объекта на материальных и электронных носителях данных;

- методы исследования и обеспечения надежности правилами современной теории надежности, направленные на действия с техническим объектом, который является овеществленным результатом гарантоспособной деятельности конструктора в виде конструкторской документации.

Важнейшее свойство эргатической системы заключается в том, что ее можно проектировать путем обоснования, упорядочения и нормирования деятельности людей. На практике это означает, что любую проектно-конструкторскую деятельность людей можно осуществлять двумя способами. Во-первых, в том виде, как она есть, т. е. стихийно сложившейся системы эмпирического и эвристического обобщения опыта, традиций и соображений здравого смысла конструкторов; во-вторых, как целенаправленное управление гарантоспособной деятельностью конструктора с использованием научно-обоснованных методов решения задач, ради которых и осуществляется конструирование. Для конструирования простых технических систем подходят эволюционно сложившиеся эргатические системы, дающие приемлемый результат, а при конструировании сложных технических систем с высокой надежностью эргатические системы необходимо изначально проектировать для достижения заданного конечного результата.

Для проектирования гарантоспособной деятельности конструктора по достижению высокой надежности наиболее важна та ее часть, которая обеспечивает принятие обоснованных и эффективных решений конструктора на ранних стадиях жизненного цикла, — это совокупность знаний, опыта, квалификации, компетенций и здравого смысла. Такая совокупность качеств конструктора является человеческим капиталом — одним из ресурсов, который используется в производстве, как условие, названное К. Марксом «самовозрастанием» стоимости [24]. Причем такой ресурс не появляется сам по себе, вследствие стихийного найма рабочей силы на рынке труда. Человеческий капитал конструктора образуется как результат полученного качественного инженерного образования (в общеобразовательной и высшей школах), принадлежности к конструкторской школе на производстве (получение на рабочем месте специальных знаний в результате наставничества) и применения действенного инструментария в работе (набора инструментов и методик для принятия и обоснования решений и действий). Причем человеческий капитал конструктора способен возрасти при условии формализации и итерационного применения процедур обоснования решений и действий конструктора за счет накопления знаний и полученного опыта.

Роль КТАН при осуществлении гарантоспособной деятельности конструкторов. Практика показывает, что КТАН целесообразно применять при требованиях безотказности выше 0,999, когда надежность изделия определяют редкие отказы, вызванные не столько результатом проектирования, сколько ошибками при разработке рабочей конструкторской документации и ненадлежащим выполнением требований чертежей при изготовлении. Применение КТАН показало, что редкие отказы могут быть сведены к минимуму [1–3, 11]. Разница между процессами разработки изделия с применением или без применения КТАН показана на рисунке.



Дерево принятия

Применение КТАН при требованиях безотказности менее 0,999 имеет смысл в случае обоснования гарантоспособной безотказной деятельности конструкторов, главным образом в конструкторских организациях с малым опытом работы. Процедуры КТАН позволяют

фокусировать внимание конструктора на рациональном использовании своего человеческого капитала и мобилизовать его на решение конструкторских задач. Неважно, насколько велики опыт и знания конструкторов, важно, что при использовании итерационных циклов проведения анализов по заданному алгоритму происходит их неизбежное накопление и в итоге самообучение. Таким образом, осуществляется адаптация конструкторской организации под требуемый уровень задач с минимальной разницей между ожидаемыми и реальными результатами проектирования.

Заключение. Применение КТАН позволяет снизить разницу между несоответствием ожидаемых и реальных результатов проектирования механизмов в части обоснования их работоспособности и надежности функционирования. Для достижения гарантоспособной деятельности конструкторов КТАН позволяет максимально эффективно и быстро повысить их знания, опыт, квалификацию, компетенцию и развить здравый смысл.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Похабов Ю.П. *Теория и практика обеспечения надежности механических устройств одноразового срабатывания*. Красноярск, СФУ, 2018, 338 с.
- [2] Горн И.А., Иванцов Н.Ю., Скрябин В.В. и др. О результатах проведения анализа надежности механических устройств раскрытия панелей солнечных батарей МКА НТ-100. *Решетнёвские чтения (9–12 ноября 2016, Красноярск)*. Ч. 1. Красноярск, 2016, с. 620–621.
- [3] Похабов Ю.П., Каверин В.А., Белов М.В. и др. Результаты конструкторско-технологического анализа надежности головного обтекателя. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2023, вып. 5. <https://doi.org/10.18698/2308-6033-2023-5-2273>
- [4] Патраев В.Е. *Методы обеспечения и оценки надежности космических аппаратов с длительным сроком активного существования*. Красноярск, СибГАУ, 2010, 136 с.
- [5] Hecht H., Hecht M. *Reliability prediction for spacecraft. Report prepared for Rome Air Development Center*, no. RADC-TR-85-229, 1985, 156 p.
- [6] Saleh J.H., Caster J.-F. *Reliability and Multi-State Failures: A Statistical Approach*. First Edition. NJ., John Wiley & Sons, 2011, 206 p.
- [7] Берг А.И. *Избранные труды*. Москва–Ленинград, Энергия, 1964, 224 с.
- [8] Половко А.М., Гуров С.В. *Основы теории надежности*. Санкт-Петербург, БХВ-Петербург, 2006, 704 с.
- [9] Александровская Л.Н., Аронов И.З., Смирнов В.В. и др. *Сертификация сложных технических систем*. Москва, Логос, 2001, 312 с.
- [10] Шашкин В.В., Карзов Г.П., ред. *Надежность в машиностроении*. Санкт-Петербург, Политехника, 1992, 719 с.
- [11] Похабов Ю.П. *Конструкторско-технологический анализ надежности*. Красноярск, СФУ, 2022. URL: <https://elib.sfu-kras.ru/handle/2311/145578?show=full&ysclid=la7xc81kmz225201519> (дата обращения: 09.02.2024).
- [12] Розенталь Р.М. Методика повышения надежности и качества ФМЕА: мировой и российский опыт развития. *РИА «Стандарты и качество» (сайт)*. URL: https://ria-stk.ru/upload/image/stq/2010/N4/04_2010-1.pdf (дата обращения: 09.02.2024).

- [13] Conley P.L., ed. *Space Vehicle Mechanisms: Elements of Successful Design*. NJ, John Wiley & Sons, 1998, 794 p.
- [14] Ковалёв В.В. Что такое «не везет» и как с ним бороться, или как обеспечить надежность РЭС при разработке. *Компоненты и технологии*, 2008, № 6, с. 100–107.
- [15] Ковалёв В.В. Что такое «не везет» и как с ним бороться, или как обеспечить надёжность РЭС при разработке (окончание). *Компоненты и технологии*, 2008, № 7, с. 132–138.
- [16] Краузе В., ред. *Конструирование приборов*. Москва, Машиностроение, 1987, кн. 1: 384 с.; кн. 2: 376 с.
- [17] Паронджанов В.Д. *Как улучшить работу ума: Алгоритмы без программистов — это очень просто!* Москва, Дело, 2001, 360 с.
- [18] Avizienis A., Laprie J.-C., Randell B., Landwehr C. Basic concepts and taxonomy of dependable and secure computing. *IEEE Trans. On Dependable and Secure Computing*, 2004, vol. 1, no. 1, pp. 11–33.
- [19] Авижиенис А., Лапри Ж.-К. Гарантоспособные вычисления: от идеи до реализации в проектах. *Труды Института инженеров по электротехнике и радиоэлектронике*, 1986, т. 74, № 5, с. 8–21.
- [20] Харченко В.С. Парадигмы и принципы гарантоспособных вычислений: состояние и перспективы развития. *Радіоелектроні і комп'ютерні системи*, 2009, № 2, с. 91–100.
- [21] Кузнецов С. SOA с гарантией качества. *Открытые системы. СУБД*, 2008, № 7, с. 72–76.
- [22] Климов Е.А. *Введение в психологию труда*. Москва, Культура и спорт, ЮНИТИ, 1998, 350 с.
- [23] ГОСТ Р 56526–2015. *Требования надежности и безопасности космических систем, комплексов и автоматических космических аппаратов единичного (мелкосерийного) изготовления с длительными сроками активного существования*. Москва, Стандартинформ, 2016, 50 с.
- [24] Маркс К. *Капитал*. Москва, Госполитиздат, 1952, т. 1, 794 с.

Статья поступила в редакцию 12.03.2024

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Похабов Ю.П. Некоторые выводы, сделанные по результатам применения конструкторско-технологического анализа надежности для изделий ракетно-космического назначения. Часть 3. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2024, вып. 4. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2024-4-2352>

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

Certain conclusions on the results of introducing the design and technological reliability analysis in rocket and space technology. Part 3

© Yu.P. Pokhabov

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

The paper presents an analysis of reasons for non-compliance between the expected and actual results in designing the one-time response mechanism to justify its performance and operational reliability. It shows that these characteristics at all stages of the mechanism life cycle are based on the designer's dependability. It is noted that the most important components of such activities include knowledge, experience, qualifications, competencies and common sense of a designer. He is able not only to accumulate them in an evolutionary way, but also to acquire through the iterative application of design and technological reliability analysis carried out according to the established algorithm making it possible to most efficiently and promptly increase the design development level of organizations. It is established that for the highly critical one-time response mechanisms, such reliability analysis should be conducted obligatory in order to reduce the difference between the expected and actual design results.

Keywords: *design and technological reliability analysis (DTRA), rocket and space technology products, reliability, failure, errors, dependability*

REFERENCES

- [1] Pokhabov Yu.P. *Teoriya i praktika obespecheniya nadezhnosti mekhanicheskikh ustroystv odnorazovogo sbratyvaniya* [Theory and practice of ensuring the need for mechanical devices of one-time response]. Krasnoyarsk, SFU Publ., 2018, 338 p.
- [2] Gorn I.A., Ivantsov N.Yu., Skryabin V.V. et al. O rezultatakh provedeniya analiza nadezhnosti mekhanicheskikh ustroystv raskrytiya paneley solnechnykh batarey MKA NT-100 [On the results of the analysis of the reliability of mechanical devices for opening the MKA NT-100 solar panels]. *Reshetnevskie chteniya (9–12 noyabrya 2016, Krasnoyarsk)* [Reshetnev Readings (November 9–12, 2016, Krasnoyarsk)]. Part 1. Krasnoyarsk, 2016, pp. 620–621.
- [3] Pokhabov Yu.P., Kaverin V.A., Belov M.V. et al. Rezultaty konstruktorskoteekhnologicheskogo analiza nadezhnosti tolkatelya golovnogo obtekatelya [Results of reliability design and technological analysis of the nose fairing pusher]. *Inzhenerny zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovations*, 2023, iss. 5. <https://doi.org/10.18698/2308-6033-2023-5-2273>
- [4] Patraev V.E. *Metody obespecheniya i otsenki nadezhnosti kosmicheskikh apparatov s dlitelnyim srokom aktivnogo sushchestvovaniya* [Methods for ensuring and assessing reliability of the spacecraft with a long active life]. Krasnoyarsk, SibGAU Publ., 2010, 136 p.
- [5] Hecht H., Hecht M. *Reliability prediction for spacecraft. Report prepared for Rome Air Development Center*, no. RADC-TR-85-229, 1985, 156 p.
- [6] Saleh J.H., Caster J.-F. *Reliability and Multi-State Failures: A Statistical Approach*. NJ, John Wiley & Sons, 2011, 206 p.
- [7] Berg A.I. *Izbrannyye trudy* [Selected works]. Moscow–Leningrad, Energiya Publ., 1964, 224 p.
- [8] Polovko A.M., Gurov S.V. *Osnovy teorii nadezhnosti* [Fundamentals of reliability theory]. St. Petersburg, BKhV-Peterburg Publ., 2006, 704 p.

- [9] Aleksandrovskaya L.N., Aronov I.Z., Smirnov V.V. et al. *Sertifikatsiya slozhnykh tekhnicheskikh system* [Certification of complex technical systems]. Moscow, Logos Publ., 2001, 312 p.
- [10] Shashkin V.V., Karzov G.P., ed. *Nadezhnost v mashinostroenii* [Reliability in mechanical engineering]. St. Petersburg, Politehnika Publ., 1992, 719 p.
- [11] Pokhabov Yu.P. *Konstruktorsko-tekhnologicheskii analiz nadezhnosti* [Design and technological reliability analysis]. Krasnoyarsk, SFU, 2022. Available at: <https://elib.sfu-kras.ru/handle/2311/145578?show=full&ysclid=la7xc81kmz225201519> (accessed February 9, 2024).
- [12] Rosenthal R.M. Metodika povysheniya nadezhnosti i kachestva FMEA: mirovoy i rossiyskiy opyt razvitiya [Methodology for increasing reliability and quality of FMEA: world and Russian development experience]. *RIA "Standarty i kachestvo" — AIA Standards and Quality*. Available at: https://ria-stk.ru/upload/image/stq/2010/N4/04_2010-1.pdf (accessed February 9, 2024).
- [13] Conley P.L., ed. *Space Vehicle Mechanisms: Elements of Successful Design*. NJ, John Wiley & Sons, 1998, 794 p.
- [14] Kovalev V.V. Chto takoe "ne vezet" i kak s nim borotsya, ili kak obespechit nadezhnost RES pri razrabotke [What is "bad luck" and how to deal with it, or how to ensure the RES reliability during development]. *Komponenty i tekhnologii — Components and Technologies*, 2008, no. 6, pp. 100–107.
- [15] Kovalev V.V. Chto takoe "ne vezet" i kak s nim borotsya, ili kak obespechit nadezhnost RES pri razrabotke (okonchanie) [What is "bad luck" and how to deal with it, or how to ensure the RES reliability during development (final part)]. *Komponenty i tekhnologii — Components and Technologies*, 2008, no. 7, pp. 132–138.
- [16] Krause V., ed. *Konstruirovaniye priborov* [Design of devices]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1987, Book 1, 384 p.; Book 2, 376 p.
- [17] Parondzhanov 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.
- [18] Avizienis A., Laprie J.-C., Randell B., Landwehr C. Basic concepts and taxonomy of dependable and secure computing. *IEEE Trans. On Dependable and Secure Computing*, 2004, vol. 1, no. 1, pp. 11–33.
- [19] Avizienis A., Laprie J.-C. Dependable Computing: from Concepts to Design Diversity. *Proc. of the IEEE*, 1986, vol. 74, no. 5, pp. 629–638.
- [20] Kharchenko V.S. Paradigmy i printsipy garantosposobnykh vychisleniy: sostoyanie i perspektivy razvitiya [Paradigms and principles of dependable computing: state and development prospects]. *Radioelektronika i kom'pyuternye sistemy — Radioelectronic and Computer Systems*, 2009, no. 2, pp. 91–100.
- [21] Kuznetsov S. SOA s garantiey kachestva [SOA with quality assurance]. *Otkrytye sistemy. SUBD — Open Systems. DBMS*, 2008, no. 7, pp. 72–76.
- [22] Klimov E.A. *Vvedeniye v psikhologiyu truda* [Introduction to occupational psychology]. Moscow, Kultura i Sport, UNITI Publ., 1998, 350 p.
- [23] GOST R 56526–2015. *Trebovaniya nadezhnosti i bezopasnosti kosmicheskikh sistem, kompleksov i avtomaticheskikh kosmicheskikh apparatov edinichnogo (melkoseriyynogo) izgotovleniya s dlitelnyimi srokami aktivnogo sushchestvovaniya* [Reliability and safety requirements for space systems, complexes and unmanned spacecrafts of unique (small series) production with long life of active operation]. Moscow, Standartinform Publ., 2016, 50 p.
- [24] Marx K. *Das Kapital*. Verlag von Otto Meisner, 1867 [In Russ.: Marks K. Kapital. Moscow, Gospolitizdat Publ., 1952, vol. 1, 794 p.].

Pokhabov Yu.P., Cand. Sc. (Eng.), Chief Specialist, JSC "NPO PM MKB".
e-mail: pokhabov_yury@mail.ru