

Документовое и прочее 57л
Ю.П. Похабов Ю.П.

Похабов Ю.П.

Конструкторско-технологический анализ надёжности. Методическое пособие (на примере системы отделения космического аппарата) : препринт / Ю.П. Похабов. – Железногорск: АО «НПО ПМ МКБ», 2020. – 57 с.

Приведён алгоритм принятия и обоснования конструкторских решений с учётом обеспечения заданной надёжности. Дана методика конструкторско-технологического анализа надёжности, направленного на раннюю профилактику возможных отказов. Рассмотрен пример выполнения анализа работоспособности и надёжности системы отделения космического аппарата.

Методическое пособие предназначено для конструкторов и специалистов по проведению аналитической верификации разработок уникальных высокоответственных систем.

ЗАРЕГИСТРИРОВАНО
№ 3644 от 27.05.2020
ООО «СИБКОПИРАЙТ»
ИНН 5406007493

Икеф
Икефрилова И.И.



ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	4
Введение	5
Раздел 1. Описание обобщённой параметрической модели функционирования..	8
1.1. Смыслы конструирования.....	8
1.2. Подход к преодолению когнитивного искажения смыслов надёжности при конструировании.....	9
1.3. Принципы составления обобщённой параметрической модели функционирования.....	14
1.4. Частный случай обобщённой параметрической модели функционирования.....	19
Раздел 2. Методика определения функциональности конструкции	22
2.1. Общие положения.....	22
2.2. Служебное назначение конструкции.....	22
<i>Пример установления служебного назначения конструкции на примере системы отделения космического аппарата</i>	24
2.3. Метод описания требуемых функций.....	25
<i>Пример описания требуемых функций</i>	26
2.3. Метод определения возможных отказов.....	27
<i>Пример определения возможных отказов</i>	27
2.4. Метод определения свойств конструктивных элементов (метод парирования отказов).....	27
<i>Пример парирования отказов</i>	28
2.5. Метод определения выходных параметров.....	29
<i>Пример определения выходных параметров</i>	31
Раздел 3. Методика определения работоспособности конструкции	33
3.1. Сценарии проведения анализа (оценки) работоспособности и надёжности.....	33
3.2. Подходы к установлению работоспособности.....	34
<i>Пример установления работоспособности</i>	35
3.3. Задачи расчёта работоспособности.....	35
3.4. Понятие режимов и условий применения.....	36

<i>Пример определения критериев для оценки достоверности расчётов параметров системы отделения</i>	39
3.4. Расчёты параметров работоспособности.....	39
<i>Примеры расчётов работоспособности системы отделения</i>	40
Раздел 4. Методика расчёта надёжности	43
4.1. Подход к расчёту надёжности.....	43
<i>Пример выбора конструктивных запасов для системы отделения</i>	45
4.2. Расчёт надёжности.....	45
<i>Пример расчёта надёжности системы отделения</i>	46
4.3. Оценка рисков невыполнения условий бездефектного производства.....	46
<i>Пример оценки рисков невыполнения условий бездефектного производства</i>	47
Выводы	49
Заключение	51
Список литературы	52
Список стандартов	56

ПРЕДИСЛОВИЕ

Разработка любых изделий является результатом компромисса инженерных и экономических решений. Удачные решения приводят к работе изделий с заданной надёжностью (плановыми технико-экономическими показателями), а неудачные – к внеплановым отказам и авариям (незапланированным финансово-экономическим потерям). За каждой причиной ненадёжности, равно как и надёжности, стоит мысль конструктора и её точное исполнение производителями и эксплуатационниками.

Производители и эксплуатационники обязаны строго выполнять требования, которые конструктор устанавливает в конструкторской (эксплуатационной) документации. Для контроля за выполнением конструктивных требований используют процедуры системы менеджмента качества, которые призваны не допускать (смягчать) дефекты, способные привести к отказам. Однако таким образом можно минимизировать лишь вторичные причины отказов, поскольку всегда существует вероятность возникновения первичных причин отказов, которые обусловлены состоянием конструкторской документации (отсутствием необходимых требований для изготовления и эксплуатации или ошибками при их установлении).

Причинами первичных отказов являются различного рода технические ошибки или неверный замысел конструктора. Машинальные ошибки в чертежах могут быть выявлены и исправлены при помощи всё тех же процедур системы менеджмента качества. Установление и смягчение ошибок конструкторского замысла до сих пор считается нерешённой задачей. Это связано с непознанными законами интеллектуально-эвристического мышления и слабо разработанными методами верификации конструкторских решений.

Необходимость управления первичными причинами отказов при разработке высокоответственных изделий привела к созданию методики конструкторско-технологического анализа надёжности (КТАН). Такой анализ позволяет на основе функционального подхода формализовать механизм принятия конструкторских решений и составлять контрольные списки (чек-листы) критериев ключевых характеристик критичных элементов для проведения необходимых расчётов, испытаний и контрольных проверок, которые призваны подтвердить заданные параметры работоспособности и показатели надёжности.

*Юрий Павлович Похабов,
канд. техн. наук, главный специалист,
АО «НПО ПМ МКБ», г. Железногорск*

ВВЕДЕНИЕ

Машиностроительные чертежи служат основой для организации целенаправленного и планомерного процесса производства изделий. В них содержатся все необходимые и достаточные требования к покупным изделиям, материалам, заготовкам, покрытиям, термообработке, размерам, формам, допускам, способам изготовления деталей и сборочных единиц, порядку и последовательности сборок, методам контроля и испытаний и т. п.

Неисполнение требований чертежей при изготовлении способно привести к дефектам, снижающим качество и надёжность выпускаемой продукции. Работа в строгом соответствии с требованиями чертежей создаёт условия для осуществления *бездефектного производства*. Принципы организации такого производства лежат в основе отечественных и зарубежных систем менеджмента качества, например Саратовской системы качества [1], КАНАРСПИ (КАчество, НАдёжность, Ресурс С Первых Изделий) [2], японских моделей управления качеством [3], международных стандартов ISO серии 9000 и т. д. Общий положительный результат достигается за счёт безусловного выполнения установленных процедур осуществления производственных работ, соблюдения технологической и производственной дисциплины, повышения квалификации персонала, применения неразрушающих методов контроля ключевых характеристик критичных элементов, проведения контрольных и приёмо-сдаточных испытаний продукции и т. п.

Однако, само по себе *бездефектное производство* является необходимым, но отнюдь не достаточным условием для обеспечения требуемой надёжности. Как показывают анализы причин отказов космической техники, существенная доля аварийных инцидентов (для механических подсистем – до 60 % от общего числа случаев) происходит из-за ошибок конструирования, в т. ч. связанных с оценкой факторов внешней среды [4]. Это говорит о том, что даже при тщательном соблюдении всех условий бездефектного производства, отказы могут происходить из-за различного рода причин, связанных с несовершенством конструкторской документации, например:

- в чертежах не установлены достаточные требования к изготовлению и техническому контролю (не предотвращена возможность возникновения скрытых дефектов);
- нарушены действующие нормы на проектирование (рекомендации, методические указания, нормали, стандарты);
- совершены просчёты и промахи при разработке конструкторской документации (машинальные, графические, логические, расчётные, арифметические и т. п.);

- не соблюдены правила конструирования, приводящие к ошибкам при выборе схемных решений, условий собираемости деталей и узлов, способов регулировки зазоров или предварительных натягов, критериев технологичности конструкций и т. д.;

- конструкторские решения не способны обеспечить достижение целей служебного назначения (содержат ложные принципы работы конструкции, неверную оценку или недооценку режимов и условий эксплуатации и т. п.).

Большинство недоработок конструкторской документации обычно удаётся выявить и устранить при проведении экспериментальной отработки изделий (по результатам исследования причин отказов). После завершения отработочных испытаний в чертежи вносят окончательные исправления, конструкторской документации присваивается соответствующая литера согласно ГОСТ 2.103 и по этой документации изготавливают изделия (опытные, серийные или единичные), пригодные к эксплуатации.

Однако на этапах изготовления и испытаний отдельные просчёты и ошибки проектирования могут не проявиться (остаются не выявленными скрытые дефекты, не реализованы худшие сочетания факторов технологической наследственности и режимов испытаний, неправильно симитированы режимы и условия применения и т. д.), что к моменту ввода изделий в эксплуатацию приводит к ложной уверенности в обеспечении требуемого качества и надёжности. Поэтому для исключения нежелательных последствий возможных отказов при эксплуатации необходимо не только строго выполнять условия осуществления *бездефектного производства*, но и тщательно соблюдать организационные и методологические правила обеспечения *бездефектного проектирования* [5], чтобы по возможности не допускать конструкторских недоработок и ошибок. Соблюдение условий бездефектного проектирования способно не только уменьшить число редких отказов при эксплуатации, но и свести к минимуму число доработок конструкций и, соответственно, снизить материальные затраты и сократить время на проведение отработочных испытаний в целом (перейдя таким образом от концепции выявления причин возможных отказов при помощи испытаний к подтверждению правильности принятых конструкторских решений).

В числе наиболее эффективных мер, обеспечивающих бездефектное проектирование (помимо соблюдения общепринятых принципов, правил, требований, норм и стандартов, например для подвижных механических узлов космического назначения – это выполнение положений стандартов *NASA-STD-5017A*, *ECSS-E-ST-33-01C* и т. п.), принято проводить расчёты параметров работоспособности (прочностные, кинематические, динамические, электрические, тепловые и др.). Однако до сих пор не существует ясных указаний – какие расчёты необходимо делать и какими критериями руководствоваться, чтобы обеспечить заданную надёжность. Кроме того, остаётся не выявленной взаимосвязь между расчётными

значениями параметров работоспособности и надёжностью, в результате чего значения показателей надёжности, определяемые статистическими методами теории надёжности, существуют сами по себе, а конструирование и расчёты параметров работоспособности – сами по себе.

Необходимость увязки результатов расчётов параметров работоспособности со значениями показателей надёжности, в первую очередь, высокоответственных изделий (для которых отказы недопустимы из-за высокой тяжести последствий) привела к разработке методики конструкторско-технологического анализа надёжности (КТАН) [6]. Суть этого анализа отражена в его названии – это **конструкторский**¹ (исходящий от конструктора) и **технологический** (с учётом используемых технологий изготовления) **анализ** (предназначенный для верификации и валидации конструкторских решений) **надёжности** (как конечной цели конструирования – безотказной работы изделий по служебному назначению). Методика КТАН является средством аналитической верификации конструкторских решений с учётом заданной надёжности в *online*-режиме (анализы могут проводиться уже начиная с первичной проработки конструктивно-компоновочных схем изделия). КТАН можно использовать в качестве укрупненного плана (дорожной карты) действий при разработке новых изделий (в первую очередь – без прототипов), для подтверждения выполнения заданных требований к проектированию (проведение аналитической, расчётной и экспериментальной верификации) либо для осуществления внешних экспертиз на достижимость поставленных целей разработки.

Результаты КТАН наиболее эффективны на этапах выпуска проектной и рабочей конструкторской документации (когда, согласно «правилу десятикратных затрат», стоимость исправления проектных и конструкторских ошибок максимально низкая [7]), поэтому базовые знания о конструкторско-технологическом анализе надёжности необходимы, в первую очередь, **конструкторам**, непосредственно осуществляющим разработку, и **расчётчикам**, выполняющим функцию беспристрастного, критически настроенного проверяющего [8].

¹ Здесь и далее понятие «конструкторский» соотносится по значению с существительным конструктор или связанным с ним, понятие «конструктивный» относится к конструкции или к чему-то необходимому для конструирования, а понятие «конструкционный» связано с чем-то используемым для изготовления деталей конструкций или являющимся составной частью конструкции.

РАЗДЕЛ 1. ОПИСАНИЕ ОБОБЩЁННОЙ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ

1.1. Смыслы конструирования

В 1904 году Герман Гедер (Herman Haeder) – немецкий гражданский инженер из города Дуйсбург, утверждал: *«При конструировании машин необходимо иметь в виду: конструкцию, соответствующую данной цели, правильный расчёт частей для достижения безопасности работы, дешевизну изготовления, красоту форм»* [9].

Таким образом, ещё в начале XX в. было очевидно, что конструктор должен владеть умениями и навыками решения четырёх основных задач:

- достигать целей служебного назначения;
- производить необходимые технические расчёты;
- делать конструкцию недорогой в изготовлении;
- не забывать об эстетике вещей.

Причём всё тот же Г. Гедер особо подчёркивал, что при решении конструкторских задач *«конструирование и расчёт не отделимы друг от друга, так как правильный расчёт должен лежать в основе всякой тщательно-выполненной конструкции»* [9].

По прошествии более чем ста с лишним лет труд конструктора преобразился до неузнаваемости. На смену кульману и логарифмической линейке пришёл компьютер, и всю рутинную работу конструктора взяли на себя компьютерные вычисления, связанные с хранением и обработкой баз данных, составлением цифровых моделей, выполнением технических расчётов и преобразованием исходной информации в удобный для последующего использования вид (чертежи, объёмные модели, спецификации, схемы, текстовые документы и проч.). Однако с расширением операционных возможностей вычислительной техники стала забываться элементарная истина: в силу своего устройства и принципов действия, компьютер не предназначен для верификации исходных данных и валидации результатов вычислений. Его задача – строго исполнять алгоритм предписанных действий какими бы ни были недостоверными (и даже абсурдными) исходные данные и неправдоподобными конечные результаты. Компьютер не думает и ничего не домысливает за конструктора, поскольку, по выражению С. Джобса (одного из основателей компании Apple), всегда *«выполняет очень простые инструкции – возьми число, прибавь его к другому числу, сравни результат с третьим, но он выполняет их со скоростью 1 000 000 операций в секунду, а на скорости 1 000 000 операций в секунду результат уже кажется*

волишебством»². В этой связи задачи конструирования, определённые (Г. Гедером) ещё в докомпьютерные времена, остаются неизменными и их по-прежнему надлежит решать конструктору (истины ради следует отметить, что за счёт высокоскоростного выполнения компьютером рутинных операций у конструктора появляются неплохие шансы использовать сбережённое время на обдумывание своих решений).

В силу указанных причин методологические проблемы конструирования, не получившие разрешения в докомпьютерные времена, продолжают оставаться нерешёнными и при использовании цифровых технологий. Одной из таких проблем является конструирование уникальных (и/или) высокоответственных изделий³ с учётом заданной надёжности. Задача конструирования таких изделий – не допустить конструкторских ошибок, приводящих к отказам, которые способны повлечь за собой финансовые, экономические, экологические, имиджевые или безопасностные риски нанесения несоизмеримо больших потерь, чем затраты на их разработку и изготовление. В неявном виде эта проблема стояла всегда, но не так остро, как при создании дорогостоящих уникальных высоконадёжных объектов ядерного и космического назначения, необходимость в которых возникла сравнительно недавно (в последние 20–30 лет) [10].

1.2. Подход к преодолению когнитивного искажения смыслов надёжности при конструировании

Существует устоявшийся взгляд на то, что абсолютно надёжных технических объектов нет и не может быть, поскольку *«случайное событие может случиться даже в том случае, если вероятность его возникновения равна нулю»* [11]. Однако есть наглядные примеры обратного в виде египетских пирамид – символа вечности, или автомата Калашникова – эталона безотказного оружия. Поскольку столь явное когнитивное искажение действительности рационально объяснить сложно, то удобно считать, что надёжность любого объекта *«во многом зависит от человеческого фактора, а именно – от таланта конструкторов-разработчиков»* [12], и тем самым оправдывать любые отказы и аварии (особенно в условиях естественной монополии на рынке⁴).

² Из интервью Стива Джобса журналу Playboy (февраль 1985 г.).

³ Под уникальными высокоответственными изделиями здесь понимаются технические объекты без прототипов с предельной надёжностью при максимально ограниченном применении способов и методов резервирования согласно Р 50-54-82.

⁴ Показательный пример – реальный разговор с руководителем одного из ведущих предприятий ракетно-космической отрасли, который свёлся к двум умозаключениям, характерным для современных «эффективных менеджеров»: 1) наземную экспериментальную отработку для того и проводят, чтобы выявлять ошибки конструкторов; 2) зачем создавать безотказные изделия, если государство всё равно даст денег на повторную разработку.

Чувствительный удар по практике конструирования нанесли расчёты надёжности на основе правил статистической теории надёжности, которые вынуждают вычислять надёжность с помощью абстрактных математических методов, оторванных от конкретных инженерных решений. В результате одна из главнейших характеристик конструкции превратилась для конструкторов в бессмыслицу, с одной стороны, требования надёжности в техническом задании устанавливаются в виде конкретных значений показателей надёжности, а, с другой стороны, никому неизвестно, как их определить и подтвердить для конкретного конструктивного решения (особенно, если нет прототипов). Как следствие в ракетно-космической технике бытуют выражения: «считают надёжность те, кто её не умеет делать» и «девятки не летают», которые в афористичной форме свидетельствуют об отсутствии взаимосвязи между конструированием и расчётами надёжности.

В конечном итоге сложился порядок разработок сложных технических систем, основанный на установленном расчётно-экспериментальном обеспечении работоспособности и надёжности, который сформирован длительной практикой отраслевого применения (и даже отдельных предприятий). Пока требования безотказности не превышали $0,9 \div 0,99$ (с учётом округления вероятности до меньшего числа девяток после запятой для большей достоверности) – такой подход к разработке технических систем считался стандартным. Однако с ростом требований к безотказности до $0,999$ и выше выяснилось, что применение тех или иных методик расчётно-экспериментального обеспечения работоспособности и надёжности на практике позволяет приблизиться лишь к определённому точечному значению функции надёжности. Судя по статистике отказов (в частности, космических механизмов раскрытия), при использовании современных методов расчётно-экспериментального обеспечения работоспособности и надёжности в ракетно-космической отрасли максимальная безотказность высокоответственных объектов не способна достичь величины $0,999$ (фактически она лежит в диапазоне $0,989 \div 0,996$) [6]. При этом известно, что вероятность $0,997$ для нормального закона распределения случайной величины соответствует трёхсигмовому диапазону изменения случайной величины (при такой вероятности наблюдаемое событие считается практически достоверным) [11]. Проблема заключается в том, что для современных высокоответственных изделий фактическая безотказность нередко назначается значительно выше $0,997$, что вынуждает относить их к классу практически абсолютно надёжных систем. Навскидку почти невозможно отличить изделия одинакового назначения с безотказностью, например, $0,9$ и $0,(9)$ (т. е. ноль и девять в периоде), но цена отказов изделий с безотказностью $0,(9)$ может оказаться столь высока, что без доказательств абсолютной надёжности теряет смысл их создания [11]. Исследования причин ненадёжности космических механизмов раскрытия

показали, что при требованиях к безотказности выше 0,999 (согласно ОСТ 92-4339) необходимо принимать во внимание риски возникновения причин редких отказов, которые, существующими методами аналитической, расчётной и экспериментальной верификации выявить невозможно [6].

В то же время конструирование технических объектов по своей природе – процедура, строго обусловленная физико-математическими законами соотношений в реальном мире. Чертежи разрабатываются до мельчайших деталей, каждая из которых предназначена для выполнения строго определённой функциональной задачи исходя из заведомо известных причинно-следственных связей (в силу имеющихся у инженеров понятий и представлений). Любой чертёж рационален, в нём не предусмотрено элементов, которые выполняют лишние, тем более случайные функции с позиций работоспособности и надёжности. Соответственно, с точки зрения заданного служебного назначения всякий чертёж (текстографическое отображение) конструкции может быть представлен эквивалентным набором *требуемых функций*, которые должны быть выполнены согласно установленному алгоритму. Понятие «*требуемая функция*» используется в данном случае в соответствии с терминологией ГОСТ 27.002 и в смысловом отношении оно эквивалентно понятиям «*заданная функция*» по ДСТУ 2860 и «*целевая функция*» по ГОСТ Р 58629. Чтобы описать набор требуемых функций с помощью математических уравнений, каждая из этих функций должна быть обусловлена определёнными критериями, в качестве которых согласно ГОСТ 27.002 могут выступать, во-первых, набор параметров, характеризующих способность выполнения функций, и, во-вторых, допустимые пределы изменения значений этих параметров.

Следует отметить, что ГОСТ 27.002 хотя и использует понятие «*требуемая функция*», но не даёт ему терминологического определения, поэтому остаётся обратиться к существующим дефинициям термина «*функция*» (предполагая, что такая функция может безразлично выступать как *требуемая*, *целевая* или *заданная*):

- *описание (как правило, вербальное) служебного назначения изделия, т. е. того, что должно делать изделие (составная часть) при его применении (использовании)* [ГОСТ Р 53394, статья 3.2.4];

- *реализация объектом выходного эффекта* [ГОСТ Р 58629, статья 3.16];

- *выполнение в объекте процесса, соответствующего его назначению, проявление заданного условия или свойства объекта согласно требованиям нормативно-технической, и (или) конструкторской (проектной) документации* [ДСТУ 2860, статья 3.1.8];

- *внешнее проявление свойств какого-либо объекта в данной системе отношений* [13].

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

Если конструкцию рассматривать как структуру, которая в процессе функционирования должна и способна сопротивляться воздействиям внешней среды (предполагается, что такая способность должна быть в известной степени избыточной, чтобы конструкция имела возможность проявить свойство надёжности), то её можно представить набором выходных параметров, значения которых определены и ограничены режимами и условиями таких воздействий при заданной наработке. Таким образом, любую конструкцию можно свести к параметрическому представлению в виде:

- набора выходных параметров, характеризующих требуемые функции для выполнения служебного назначения,
- допустимых значений изменения выходных параметров, определённых режимами и условиями применения;
- наработки, в течение которой значения выходных параметров не будут превышать допустимых ограничений.

Совокупность выходных параметров объекта, характеризующих наличие и конкретный набор возможностей выполнять требуемые функции, является его *функциональностью*, которую можно выразить в виде

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

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

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

- **прочность** как обобщённая характеристика геометрических размеров сечений строительных конструкций и механических свойств конструкционных материалов, противостоящая внешним нагрузкам (несущая способность конструкции должна превышать действующие нагрузки);
- **движущий момент** на приводе как характеристика энергодостаточности актуатора механизма для преодоления нагрузки в виде момента резистивных сил на пути движения (момент на приводе должен быть выше момента сил сопротивления);

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

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

На этапе установления функциональности (1) объекта нет смысла производить вычисления значений выходных параметров, поскольку в данном случае решается задача составления контрольного списка (чек-листа) параметров, которые в дальнейшем будут использованы для расчётно-экспериментальной верификации и валидации объекта.

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

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

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

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

Вероятность нахождения во времени значений выходных параметров конструкции в допустимой области характеризуют **надёжностью** – свойством сохранять во времени выполнение требуемых функций в заданных режимах и условиях применения:

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

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

При определении вероятностей (3) для оценки нахождения значений параметров в допустимых областях при наработке до отказа могут быть использованы два взаимозаменяемых метода:

- **детерминированный** (путём задания конструктивных запасов по каждому из параметров таким образом, чтобы с определённым доверием гарантировать нахождение значений рассматриваемых параметров в допустимой области) [6];

- **стохастический** (например, путём оценки конструкционной индивидуальной надёжности [14], суть которой заключается в вычислении вероятностей нахождения

параметров в допустимых областях исходя из индивидуальных характеристик материалов, процессов нагружения/воздействий и технологий изготовления изделий).

Совокупность выражений (1) – (3) представляет собой **обобщённую параметрическую модель функционирования** объекта [15], в которой критерии требуемых функций (выходные параметры и допустимые диапазоны изменения их значений) взаимосвязаны, взаимообусловлены и подчинены целям достижения заданной работоспособности и надёжности объекта при выполнении служебного назначения.

Поскольку в основу представленной модели заложен функциональный подход (определение значений выходных параметров изделия исходя из условий выполнения требуемых функций) [16], то такая модель даёт возможность абстрагироваться от конкретного конструктивного исполнения объектов и может использоваться для описания функционирования технических систем различного назначения, например строительных сооружений, механизмов однократного и многократного срабатывания, электромеханических устройств, электронных сборок, силовых и прецизионных конструкций и т. п. Использование **обобщённой параметрической модели функционирования** позволяет снять когнитивное искажение смысла надёжности, поскольку связывает целесообразность проведения всех необходимых расчётов по выбору параметров конструкции с учётом выполнения критериев требуемых функций для обеспечения заданной работоспособности и надёжности.

1.3. Принципы составления обобщённой параметрической модели функционирования

Если предположить, что для описания функционирования конструкции достаточно использовать лишь один выходной параметр – прочность T (без разделения прочности по предельным состояниям – общей прочности, усталости, долговечности, длительной прочности, температурной прочности, ползучести и т. д.), то для полного описания критериев требуемых функций (сопротивления действующим нагрузкам N) будут служить выражения (1) – (3), определённые только параметрами прочности и нагрузок:

- функциональность определяется единственным элементом множества (1) – прочностью $X = T$;
- работоспособность (2) – выражением $D_x = T > N$ (способность сохранять прочность при действии внешних нагрузок);
- надёжность (3) – свойством сохранять прочность при действии внешних нагрузок во времени, которая в стохастической постановке определяется по формуле

$$R_{\text{пр}} = P(T > N), \quad (4)$$

а в детерминированной постановке производится проверка выполнения условия $T/\mu > fN$, где μ – запас прочности; f – коэффициент безопасности, при этом значения показателей μ и f назначают согласно ГОСТ Р 56514 исходя из требуемого уровня надёжности (принято считать, что $f = 1,2 \div 1,5$ эквивалентен $R_{пр} = 0,999\ 9 \div 0,999\ 999\ 9$ [17] и на практике это соответствует условию *whp* $R_{пр} \equiv 1$).

Коэффициенты безопасности несут смысл разделения средних значений прочности и нагрузок для повышения вероятности того, что в пределах заданной наработки значения параметров нагрузки ни разу не превысят значений, которые принимают параметры прочности. Произведение коэффициента безопасности и действительного (эксплуатационного) значения нагрузки принято называть расчётной нагрузкой. Соответственно, физический смысл запаса прочности – это характеристика конструкции выдерживать внешние нагрузки сверх расчётных значений (для повышения надёжности).

Обеспечение прочности конструкции является базовым условием выполнения требуемых функций для любых изделий: стационарных (неподвижных) или трансформируемых (снабжённых механическими устройствами, преобразующими движения своих составных частей). Практически для всех стационарных конструкций (строительных сооружений, несущих корпусов, сосудов и т. п.) обеспечение прочности (с учётом многообразия предельных состояний) является единственной требуемой функцией.

Наличие в конструкции механизмов приводит необходимости соблюдения второго условия выполнения требуемых функций – обеспечения энергодостаточности приводов для осуществления заданных перемещений при относительных движениях тел⁵

$$M_{дв} > M_c,$$

где $M_{дв}$ – движущий момент на приводе для обеспечения заданного перемещения; M_c – момент сопротивления на пути движения подвижных частей механизма [19, 20].

Применительно к выражениям (1) – (3), выполнение механизмом требуемых функций с учётом обеспечения прочности в общем виде характеризует его

- функциональность $X = \{T, M_{дв}\}$,
- работоспособность $D_x = \begin{cases} T > N \\ M_{дв} > M_c \end{cases}$,

- надёжность

$$R = P\{(T, M_{дв}) \in D_x\}. \quad (5)$$

⁵ Механизм – искусственно созданная система тел, предназначенная для преобразования движения одного или нескольких тел в требуемые движения других тел [18].

Формула (5), в случае независимости составляющих её величин по надёжности, может быть преобразована к виду

$$R = R_{\text{пр}}R_{\text{ф}}, \quad (6)$$

где $R_{\text{пр}}$ – надёжность по прочности (4); $R_{\text{ф}} = P(M_{\text{дв}} > M_c)$ – надёжность по функционированию на заданном перемещении.

Для соблюдения требуемой надёжности по функционированию *whp* $R_{\text{ф}} \equiv 1$ (дополнительно к требуемому уровню надёжности по прочности *whp* $R_{\text{пр}} \equiv 1$) производят проверку выполнения условия $M_{\text{дв}} > kM_c$, где k – запас движущего момента, который назначают исходя из требуемого уровня надёжности, подтверждённого практикой применения (например, согласно *AIAA S-114–2005*, *NASA-STD-5017A* или *ECSS-E-ST-33-01C*). Физический смысл запаса движущего момента k – разделение средних значений движущего момента и момента сил сопротивления для повышения надёжности, что фактически соответствует предназначению коэффициента безопасности f в прочности [6, 21–23].

Формулу (6) принято использовать для расчётов проектной (базовой) надёжности [6, 19–23], которая является необходимым, но недостаточным условием безотказной работы механизмов. Как показывает статистика отказов механизмов раскрытия космических конструкций [15], точность результатов расчётов надёжности по формуле (6) только лишь с учётом параметров прочности и энергодостаточности приводов раскрытия не позволяет обеспечить заданную надёжность выше 0,999, поскольку как правило существуют другие конструктивные и технологические факторы, которые способны привести к отказам. Из анализа статистики причин отказов механизмов раскрытия космических конструкций следует, что нераскрытия могут быть вызваны внезапным исчезновением зазоров в кинематических парах (Кикю-8, Союз ТМА-17М), редким сочетанием производственных факторов (Intelsat-19), технологическими ошибками (Канопус-СТ), несоблюдением условий проведения особо ответственных операций (Прогресс М-19М), зацеплением за маты экранно-вакуумной теплоизоляции при изменении их динамических размеров в условиях невесомости (Союз-1), попаданием в механизм раскрытия посторонних предметов (Skylab, Telstar 14, Telstar 14R), отказами приводов раскрытия (EchoStar-4), преждевременным несанкционированным срабатыванием механизмов (Ресурс-П № 3), неучтёнными конструкторско-технологическими факторами (Маяк), холодной сваркой (Galileo) и т. д. [15]. Каждая из указанных причин отказов является следствием конструкторских или технологических ошибок, которые способны

снизить проектную надёжность (6). Причём точность расчётов надёжности без учёта причин редких отказов может достигать не менее порядка величины значащей цифры⁶.

Для обоснования конструкторских и технологических решений (которые детализируют проектные решения и учитывают заводские технологии изготовления) на этапе разработки рабочей конструкторской документации (привязанной к технологическим возможностям производства) вместо (6) следует использовать формулу

$$R = R_{\text{пр}} R_{\text{ф}} R_{\text{кт}}, \quad (7)$$

где $R_{\text{кт}}$ – конструкторско-технологическая надёжность, которая зависит от конструктивных и технологических факторов, связанных, например с обеспечением зазоров в кинематических парах, виброустойчивостью соединений, стабильностью настроек механизмов, достаточностью хода исполнительных устройств, режимами выполнения особо ответственных операций и т. п.

Каждый из конструктивных и технологических факторов должен быть определён выходными параметрами конструкции и допустимыми диапазонами изменения их значений. Например, для обоснования конструкторских решений в механизмах раскрывающихся конструкций с учётом рисков внезапного исчезновения радиальных и/или осевых зазоров Δ в кинематических парах при наработке, выражения (1) – (3) следует рассматривать в виде

- функциональности $X = \{T, M_{\text{дв}}, \Delta\}$,
- работоспособности $D_x = \begin{cases} T > N \\ M_{\text{дв}} > M_c, \\ \Delta > 0 \end{cases}$,
- надёжности $R = P\{(T, M_{\text{дв}}, \Delta) \in D_x\}$.

Надёжность по условию сохранения зазоров в кинематических парах определяют с учётом вероятностей их внезапного исчезновения в условиях применения, например вследствие тепловых деформаций, несоосностей подшипниковых узлов из-за технологических факторов, нарушений равномерного распределения твёрдосмазочного покрытия между обоймами подшипника, возможных попаданий в радиальный зазор твёрдых минеральных частиц и т. п. Вычисления суммарной надёжности с учётом условий сохранения зазоров Δ производят с учётом формулы (7), где под $R_{\text{кт}}$ (как частного случая конструкторско-технологической надёжности) понимают надёжность по условию сохранения зазоров в кинематических парах.

⁶ По аналогии с инженерными расчётами – это соответствует точности искомого результата не на проценты (обычно нормой считается погрешность $5 \div 10\%$) и даже не в разы (например, в два-три раза), а на порядки, т. е. не менее, чем в десять-сто раз (!).

В общем виде (при наличии множества факторов, способных привести к отказам) конструкторско-технологическая надёжность равна

$$R_{\text{КТ}} = \prod_{i=1}^m R_i, \quad (8)$$

где m – число выходных параметров объекта, определяющих его конструкторско-технологическую надёжность.

На практике общее число выходных параметров (с учётом прочности, энергодостаточности приводов и конструкторско-технологических факторов), по которым рассчитывают работоспособность и надёжность изделий, определяют априорно исходя из критичных элементов, чья критичность на основе имеющихся знаний и опыта не вызывает сомнений. Проблема заключается в том, что со временем у каждого расчётчика (конструктора) вырабатывается стереотип проведения технических расчётов и, если в новых изделиях появляются критичные элементы, критичность которых по какой-либо причине является неочевидной (например, ускользает от внимания из-за эффекта «замыливания глаз»), то расчёты для них могут быть не проведены, что способно обернуться отказами, многочисленные примеры которых приведены в работах [6, 15].

Для высокоответственных изделий при определении функциональности (1) необходимо учитывать наибольшее число выходных параметров, влияющих на надёжность, причём исходя из принципов конструирования очевидно, что объективно существует такое количество элементов множества (1), при котором надёжность (7) *whp* $R \equiv 1$. Причём на практике достаточно выявить максимально возможное (исходя из компетентности и опыта конструктора) число выходных параметров конструкции, которые влияют на проектную (6) и конструкторско-технологическую (8) надёжность, чтобы обобщённая параметрическая модель функционирования (1)–(3) приобрела смысл **условий безотказного функционирования**, служащих для обоснования конструкторских решений и контроля ключевых характеристик⁷ критичных элементов на всех стадиях жизненного цикла.

Несмотря на кажущиеся перспективы рассмотрения неопределённого множества выходных параметров конструкции, на практике они всегда конечны и при должном методическом подходе поддаются выявлению и техническому контролю. Например, автомобиль содержит от 15 до 25 тыс. деталей; примерно 20–22% относятся к деталям лимитирующим надёжность (срок их службы меньше срока службы автомобиля), из них

⁷ Ключевая характеристика – свойство или особенность, изменение которого оказывает существенное влияние на внешний вид продукции, её пригодность, назначение, качество функционирования, срок службы или технологичность. Для контроля за отклонениями ключевых характеристик требуется принятие специальных мер [ГОСТ Р ЕН 9100, статья 3.4].

около 200–300 деталей (1,1–1,3%) являются критическими по надёжности (срок службы не превышает года) [24]. Также известно, что требования конструкторской документации, влияющие на надёжность авиационных двигателей, составляют всего лишь 0,5–0,7% от общего числа требований к изготовлению [25]. В конце концов, если конструктор способен аргументированно объяснить, зачем в его конструкции находится та или иная мельчайшая деталь, то он способен и обосновать выполнение возложенных на неё функций.

Здесь важно понимать физический смысл *условий безотказного функционирования* – они способны создать предпосылки для обеспечения работы изделия без отказов, при этом результат расчёта надёжности (7) указывает на степень уверенности конструктора в том, что принятые им решения обоснованы с той или иной степенью доверительной вероятности. При этом такая вероятность не предназначена для характеристики частоты возникновения возможных отказов. Для подсчётов вероятностей возникновения отказов необходимо использовать статистические методы теории надёжности, что целесообразно, если они соответствуют физико-математическим законам и это имеет какой-либо практический (например, финансово-экономический) смысл. Если предположить, что функцию надёжности $R(t) = P(\tau > t)$ можно разложить в ряд Тейлора так, чтобы каждый член этого ряда отражал бы только одну из причин отказов, то под конструкторско-технологическими отказами следует понимать все члены ряда выше составляющих первого порядка, которые для механизмов определяются прочностью и энергодостаточностью приводов. С точки зрения частотного смысла отказов каждый последующий член ряда Тейлора в меньшей степени влияет на надёжность, однако с позиций формулы полной вероятности $R(t) + Q(t) = 1$ для высокоответственных изделий важен учёт всех членов ряда, что в конечном итоге обеспечивает повышение надёжности до значений *whp* $R \equiv 1$ за счёт принятия во внимание причин отказов с малыми вероятностями.

1.4. Частный случай обобщённой параметрической модели функционирования

Согласно ГОСТ 27.002 для дефиниции термина «надёжность» используют два определения, соответствующие моделям, которые описывают сущность надёжности:

- параметрической, когда требуемые функции представляют в виде набора выходных параметров, характеризующих способность их выполнения, и допустимых пределов изменения значений этих параметров (выходные параметры являются измеряемыми или/и расчётными физическими величинами);

- функциональной, если выполнение требуемых функций характеризуют вероятностными показателями отказов (когда есть смысл выражать выходные параметры

через показатели статистических, вероятностно-статистических, логических, байесовских или субъективных вероятностей возникновения возможных отказов).

Если элементы конструкции заменить эквивалентным набором выполняемых ими требуемых функций, то часть этих функций может быть представлена с помощью функциональной модели, а оставшиеся – параметрической. При необходимости функциональную модель любого конструктивного элемента можно описать с помощью информационной модели в виде чёрного ящика, в которой выполнение требуемых функций характеризуют вероятностью безотказной работы P_i . В этом случае вычисление вероятностей, в зависимости от природы случайных величин, может быть произведено двумя способами:

1) если случайной величиной являются случайные события, например срабатывания устройств однократного применения (пирочек), то вероятность безотказной работы определяют по формуле

$$P_i \approx n/N, \quad (9)$$

где n – число неотказавших элементов; N – число элементов, поставленных на эксперимент;

2) если случайной величиной является случайный процесс, который определяется временем до отказа, например наработкой до отказа (ресурсом) электрорадиоизделий (ЭРИ), то вероятность безотказной работы определяют по формуле

$$P_i = \int_t^{\infty} \varphi(t) dt, \quad (10)$$

где $\varphi(t)$ – плотность распределения времени t до отказа.

Вероятности P_i (9) – (10) как показатели выполнения требуемых функций должны быть учтены как дополнительные элементы множества при определении функциональности (1) наравне с выходными параметрами

$$X_i \cong P_i. \quad (11)$$

Условие работоспособности (2) при выполнении требуемых функций может быть записано в виде

$$D_x = P_i > P_{\text{доп}}, \quad (12)$$

где $P_{\text{доп}}$ – допустимое значение вероятности, вычисленное методом распределения показателей безотказности изделия между его составными частями, например по ОСТ 1 00448.

Условие надёжности (7) определяют с учётом P_i в виде

$$R = P(P_i > P_{\text{доп}}), \quad (13)$$

где $P(\bullet)$ – вероятность как степень уверенности, что выражение в круглых скобках выполнено.

Физический смысл формулы (13) заключается в том, что имея статистическую вероятность P_i конструктивного элемента, которая должна соответствовать допустимым значениям $P_{\text{доп}}$ (12), необходимо ещё конструкторско-технологическими методами обосновать невозможность (или маловероятность) рисков снижения вероятности P_i в заданных режимах и условиях применения, которые характерны для данной конкретной конструкции (т. е. повысить доверительный уровень статистической вероятности). Например, одним из таких методов является резервирование критичных элементов согласно Р 50-54-82, в результате чего условие (13) может быть приведено к виду:

$$R = [1 - (1 - P_i)^{p+1}] > P_{\text{доп}}, \quad (14)$$

где p – степень кратности резервирования.

Очевидно, что выходные параметры и вероятностные показатели выполнения требуемых функций объекта могут быть приведены к согласованному безразмерному виду. Это становится возможным, если выходные параметры представляют в виде вероятности того, что в пределах заданного отрезка времени значения выходных параметров ни разу не превысят допустимых значений. После таких преобразований все вероятности, независимо от своего происхождения (на основе физических либо информационных моделей) окажутся пригодными для расчёта надёжности методом структурной схемы надёжности согласно ГОСТ Р 51901.14. Если в конструкции преобладают точки единичного отказа (элементы, в конструкции которых не предусмотрено резервирования), то удобно использовать метод сворачивания структуры надёжности (метод свёртки), основанный на замене нескольких параллельно соединённых структурных элементов одним элементом с эквивалентной надёжностью, учитывающей параллельность соединения [26]. Таким образом, сложную структуру можно свернуть в последовательную структуру, надёжность которой определяют по формуле (7).

Указанный подход даёт возможность рассматривать функциональную модель надёжности как частный случай единой параметрической модели надёжности, учитывающей одновременно физическую и статистическую (математическую) природу функционирования конструктивных элементов изделия.

РАЗДЕЛ 2. МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНОСТИ КОНСТРУКЦИИ

2.1. Общие положения

Для выявления функциональности конструкции используют дедуктивный подход (по схеме «сверху–вниз»), в результате которого требуемые функции обнаруживают в процессе рассуждений (анализа) о внешнем проявлении объектом или его элементов ожидаемых (предполагаемых) свойств в заданных режимах и условиях применения. Функциональность в виде множества выходных параметров (1), предназначенных для выражения количественных характеристик ожидаемых свойств, определяют при анализе конструкции от общего к частному – от конструкции в целом, к её функциональным группам, узлам, деталям, элементам конструкции и интерфейсам.

Процедуры методики выявления функциональности конструкции осуществляют последовательно, устанавливая:

- задачи служебного назначения конструкции;
- требуемые функции при выполнении служебного назначения;
- отказы как события, препятствующие выполнению требуемых функций;
- свойства конструкции, при реализации которых отказы становятся невозможными;
- выходные параметры, которыми характеризуют искомые свойства.

2.2. Служебное назначение конструкции

Определение, для чего именно предназначена разрабатываемая конструкция, является целеполагающей частью любого анализа. От того, насколько детально и точно будут определены задачи служебного назначения зависит достоверность любого анализа.

В общем случае под *служебным назначением* понимается *задача, для решения которой создаётся изделие, включающая (помимо общих целей проектирования) все дополнительные условия, ограничения и требования, которые эту задачу количественно уточняют и конкретизируют* [27].

На практике проектирование любого технического объекта начинается с *технического задания* – исходного технического документа для разработки и испытаний изделия⁸ в соответствии с требованиями ГОСТ Р 15.016, ГОСТ Р 55996, ОСТ 134-1005 и т. п. Техническое задание определяет требуемые характеристики объекта такими, какими их видит заказчик и является базовым документом для установления служебного

⁸ Определение термина «техническое задание» дано по ГОСТ 25123, статья 1.1.

назначения. Помимо общих целей и задач проектирования в техническом задании устанавливают режимы и условия применения объекта, что имеет основополагающее значение при выполнении анализов:

- во-первых, режимы и условия применения фактически являются информационной моделью временных факторов и внешних воздействий на объект по его интерфейсам, которая при итерационных циклах проведения анализа остаётся неизменной;

- во-вторых, именно установленные в техническом задании значения параметров режимов и условий применения служат критериями для верификации и валидации работоспособности и надёжности объекта (согласно определения термина «надёжность» по ГОСТ 27.002, отказы при действии режимов и условий применения, не соответствующих требованиям технического задания, не имеют отношения к надёжности, поскольку это результаты, которые скорее всего соответствуют понятию «эксперимент»⁹).

Однако для установления служебного назначения одних только сведений об объекте, содержащихся в техническом задании недостаточно. Необходимо иметь **исходные данные** – *исходный технический документ на разработку составной части системы, детализирующий требования технического задания в части конструктивного исполнения, определённых функциональных параметров или порядка их подтверждения, интерфейсов и т. п.*¹⁰ (который выпускается на основании теоретического чертежа, пояснительной записки к нему и лимитной сводки масс). Фактически, исходные данные являются описанием разрабатываемого объекта таким, каким его видит разработчик (с условиями, ограничениями и требованиями, которые уточняют и конкретизируют техническое задание).

На основании **исходных данных** производится разработка текстографической (или цифровой) модели, соответствующей стационарной стохастической модели объекта в виде конструкторской документации по ГОСТ 2.102, которая может итерационно уточняться (изменяться) вплоть до ввода изделия в эксплуатацию, соответственно, стохастическая модель объекта на каждом итерационном шаге при выпуске конструкторской документации рассматривается как стационарная в состоянии «как она есть».

Стационарная стохастическая модель объекта – это текстографическое описание реальных или гипотетических (ещё неизготовленных) изделий, которые могут быть получены в результате многократного изготовления при безусловном соблюдении всех требований в конструкторской документации (в условиях бездефектного производства).

⁹ Эксперимент – система операций, воздействий и (или) наблюдений, направленных на получение информации об объекте при исследовательских испытаниях [ГОСТ 24026, статья 1].

¹⁰ Определение термина «исходные данные» согласно РК-11-КТ.

Допуски параметров конструкции в пределах каждого итерационного шага являются неизменными (стационарными), но значения этих параметров меняются случайным (стохастическим) образом в пределах заданных допусков при каждом реальном или гипотетически возможном воплощении, а, следовательно, могут быть осуществлены и развёрнуты во времени. Таким образом, число гипотетических воспроизведений однородных изделий τ (изготовленных по одной документации, на одном оборудовании, одними специалистами), при котором они способны обеспечить безотказность, является случайной величиной, которая по смыслу не может быть ничем иным, как временем безотказной работы изделия t , выраженным в числе реальных воспроизведений. Указанное свойство стационарной стохастической модели объекта является основополагающим для осуществления анализа надёжности, что соответствует условию её обеспечения в виде $R(t) = P(\tau > t)$.

Исходные данные служат не только основанием для начала конструирования, но и совместно с конструкторской документацией, являются информационной базой для установления задач **служебного назначения** объекта, которые необходимо определить для верификации и валидации разработки на достижение критериев работоспособности и надёжности.

Пример установления служебного назначения конструкции на примере системы отделения космического аппарата (КА). Главная задача системы отделения – это обеспечить механическую связь КА с ракетой-носителем при полёте так, чтобы по заданной программе разделить¹¹ и развести их друг от друга на безопасное расстояние с заданными относительными скоростями (линейными и угловыми).

В общем виде (без детализации конструктивных особенностей) система отделения состоит из силовых узлов, которые закреплены на ракете-носителе (адаптера, корпусов замков, крепёжных и соединительных элементов), механических устройств (замков зачековки, толкателей), пиросредств (пирочек), ЭРИ (электрических кабелей и разъёмов), электронных сборок (ЭРИ, размещённых, присоединённых и закреплённых в конструкции сборки), электромеханических устройств (концевых выключателей) и, собственно, присоединённого к ней КА.

В проектном понимании (как комплекс взаимосвязанных процессов, предназначенных для достижения служебного назначения), каждая составная часть конструкции системы отделения в общем виде предназначена для выполнения частных задач, осуществление которых в заданной последовательности обеспечивают решение главной задачи:

- **силовые узлы и замки зачековки удерживают КА** на последней ступени ракеты-носителя в процессе наземного обслуживания, транспортирования и выведения, когда действуют статические, квазистатические, динамические, вибрационные, ударные, акустические и тепловые нагрузки;

¹¹ Термины «разделение» и «отделение» здесь и далее даны по ГОСТ В 25613.

- ЭРИ и электронные сборки **обеспечивают передачу электросигналов** по командам, которые заданы программой полёта;
- **пиросредства иницируют срабатывание** механических устройств в момент времени, предусмотренный программой полёта;
- **замки зачеховки разделяют КА с ракетой-носителем** (разрывают удерживающие механические связи);
- **толкатели отделяют КА от ракеты-носителя** при заданных термовакuumных и микрогравитационных воздействиях в условиях конструктивных ограничений;
- **концевые выключатели формируют контрольную точку** в циклограмме функционирования КА для соблюдения последовательности временных и функциональных команд, управляющих процессов.

2.3. Метод описания требуемых функций

Выполнение каждой из задач служебного назначения на практике может быть обусловлено не одной, а несколькими **требуемыми функциями**, например удержание КА на ракете-носителе с последующей возможностью отделения достигается при выполнении следующих условий – элементы конструкции сопротивляются нагрузкам без нарушения прочности (не разрушены, не потеряли устойчивость, не имеют недопустимых или пластических деформаций), уровни резонансов при вибрациях не критичны, характеристики трибологических сопряжений не изменяются во времени и т. п. Выполнение условий, при которых задачи могут быть выполнены, достигается выбором свойств конструктивных элементов (применёнными конструкционными материалами, выбранными геометрическими размерами, настройками и способами сохранения позиционирования и т. д.). По этой причине, после установления главных и частных задач служебного назначения необходимо определить **требуемые функции**, которые выполняет объект и его составные части.

При функциональном подходе [16], требуемые функции определяют вопросом «что делает объект или отдельные его элементы?», подразумевая под сутью данного вопроса действия (события, явления, процессы) – динамичные (обеспечивающие относительную подвижность) или статичные (не приводящие к подвижности), либо бездействия, которые препятствуют совершению несанкционированных (преждевременных) событий (явлений, процессов). Формулировка функций должна быть краткой, содержательной и обобщённой. Краткость заключается в том, что формулировка должна отвечать на вопрос «что делает объект...?» по возможности в двух словах, одно из которых указывает действие объекта (глагол в настоящем времени), а второе – называет другие объекты, элементы, события, явления или процессы, на которые направлено это действие (существительное, «воспринимающее» действие этого глагола). Для наполнения глагола и существительного

(определяющих функцию) содержательностью и обобщённостью, формулировка функции может быть дополнена пояснениями, если речь идёт о процессах, происходящих в «воспринимающих» объектах при действии основного объекта, или об условиях осуществления событий, явлений или процессов. При вербальном описании требуемых функций с использованием вопроса «что делает объект...?» следует придерживаться правила:

NB! Любая функция является внешним проявлением конкретного свойства объекта, которое определяется как результат отношения объектов или их элементов при заданных режимах и условиях применения (использования) в виде взаиморасположения, взаимосвязей и взаимодействий [6].

Требуемые функции исходя из задач служебного назначения определяют в зависимости от конструктивного исполнения системы отделения, например выбранных конструктором конструктивно-компоновочных и конструктивно-силовых схем, конструктивных соединений, принципов действия механических устройств, типоминалов ЭРИ, состава и конструктива электронных сборок и т. д. Вербальное описание требуемых функций производят **исключительно** на основе конструкторской документации или иной текстографической документации (схемных проработок, эскизов, теоретических чертежей и проч.).

Пример описания требуемых функций. Требуемые функции конструкции в порядке осуществления алгоритма функционирования системы отделения могут иметь следующий вид (конструкция, что делает?):

- 1) **противостоит нагрузкам и воздействиям** (в стартовом положении ракеты-носителя);
- 2) **обеспечивает виброустойчивость** (конструктивных элементов в стартовом положении, которые влияют на срабатывание механических устройств);
- 3) **не допускает срабатываний** (концевых выключателей до начала процесса отделения);
- 4) **передаёт электросигнал** (на пирочеки);
- 5) **воспламеняет пирочеки**;
- 6) **производит срабатывание** (замков зачеховки – разрывает механические связи между КА и ракетой-носителем);
- 7) **предотвращает зацепление** (подвижных частей при отделении);
- 8) **отделяет КА от ракеты-носителя** (разводит на безопасное расстояние с заданными линейными и угловыми скоростями);
- 9) **подаёт электросигнал** (от концевого выключателя к бортовому комплексу управления, для оповещения о завершении работы системы отделения).

В общем виде, выполнение конструкцией системы отделения функций 1–3 обеспечивает задачу удержания КА на ракете-носителе, функций 4–6 – разделения КА от ракеты-носителя, функций 7–8 – отделения КА, а функция 9 создаёт

необходимые условия для функционирования КА после срабатывания системы отделения.

2.4. Метод определения возможных отказов

Выявление возможных отказов производят в виде вербального описания гипотетических событий, которые препятствуют выполнению соответствующих требуемых функций. Таким образом, отказами системы отделения являются любые события, которые делают невозможным отделение КА от ракеты-носителя и разведение их на безопасное расстояние. В связи с тем, что надёжность срабатывания средств телеметрии (концевых выключателей) напрямую влияет на алгоритм работы системы отделения, под отказами следует также понимать события, вызывающие нарушения циклограммы функционирования КА, например преждевременную подачу или неподачу команд на срабатывание раскрывающихся конструкций (панелей солнечных батарей, поворотных и зонтичных антенн, штанг приборов и проч.).

Пример определения возможных отказов. Исходя из выявленных требуемых функций конструкции системы отделения, к возможным отказам могут привести следующие события:

- 1) **разрушения** (или необратимые деформации) конструктивных элементов, которые оказывают влияние на срабатывание механизмов (ухудшают или делают невозможным процесс их функционирования);
- 2) **нарушения** позиционирования, целостности, настроек и иных характеристик сопряжённых элементов конструкции при вибрациях, которые влияют на срабатывание механизмов;
- 3) **срабатывания** концевых выключателей до начала процесса отделения;
- 4) **непрохождение** электросигналов на пирочеки;
- 5) **невоспламенение** пирочек;
- 6) **несрабатывание** замков зачековки (неразрыв механических связей);
- 7) **зацепления** (заклинивания, блокирования) подвижных частей при отделении;
- 8) **неотделение** КА (соударения при отделении или неразведение на безопасное расстояние);
- 9) **непрохождение** электросигналов от концевого выключателя к бортовому комплексу управления (для оповещения о завершении работы системы отделения).

2.5. Метод определения свойств конструктивных элементов (метод парирования отказов)

Известный перечень возможных причин отказов позволяет определить условия, которые способны сделать выполнение выявленных отказов невозможными. Поиск таких условий производится методом отрицательных суждений (антитезисов). Логическая схема анализа построена на том, что в качестве исходного используется предвзятое суждение, основанное на том, что отказ какого-либо критичного элемента уже «произошёл». Если при

конструировании предприняты и документально подтверждены необходимые и достаточные меры, которые позволяют устранить причину возможного отказа, то это служит доказательством того, что означенное отрицательное суждение ложно и, следовательно, условие безотказности обеспечено. Под условием безотказности понимают свойство конкретного критичного элемента, которое делает данную причину отказа невозможной [6].

При определении свойств конструктивных элементов методом парирования могут рассматриваться несколько причин возможных отказов, каждая из которых привязана к конкретным свойствам конструктивного элемента или узла, что автоматически указывает на его критичность. Например, причинами нераскрытия поворотной конструкции может быть самоторможение (возникновение недопустимо высокого момента сил сопротивления), запрессовка (внезапное исчезновение радиального зазора) или заклинивание (внезапное исчезновение радиального зазора) в шарнирном узле [14, 15]. Любая возможная причина отказа может быть парирована приданием критичным элементам строго определённых свойств (например, применительно к шарнирному узлу поворотной конструкции – это выбор требуемых характеристик привода, задание соответствующих трибологических характеристик кинематических пар, назначение необходимых радиальных и осевых зазоров в подшипниках и т. п.), которые должны быть обеспечены в конструкторской документации и осуществлены при изготовлении.

Пример парирования отказов. Перечень ожидаемых (предполагаемых) свойств критичных элементов для предотвращения (снижения вероятности) возможных отказов системы отделения, может выглядеть следующим образом:

1) свойство конструктивных элементов механизмов, влияющих на срабатывание, обеспечить **прочность** в процессе и после действия нагрузок и воздействий в стартовом положении КА;

2) свойство сопряжённых элементов конструкции, влияющих на срабатывание, обеспечить **сохраняемость** характеристик после воздействия вибраций в стартовом положении КА;

3) свойство мест контакта конструкции системы отделения с концевым выключателем обеспечить **деформации**, препятствующие их срабатыванию;

4) свойство электрокабеля и токопроводящих соединений обеспечить **прохождение** электросигналов на пирочку;

5) свойство пирочек обеспечить **иницирование** процесса срабатывания механизмов (воспламенение, подрыв порохового заряда и перемещение актуатора);

6) свойство исполнительных элементов обеспечить **энергодостаточность** для реализации процесса срабатывания замков зачековки;

7а) свойство конструкции обеспечить **беспрепятственное** перемещение частей механизмов при срабатывании (без заклинивания, зацепления или блокирования);

7б) свойство установочных элементов системы отделения обеспечить **разделение** КА без заклинивания при тепловых воздействиях;

- 8) свойство толкателей обеспечить **разведение** отделяемых частей на безопасное расстояние с заданными линейными и угловыми скоростями;
- 9) свойство электрокабеля и токопроводящих соединений обеспечить **прохождение** электросигналов от концевого выключателя к бортовому комплексу управления.

2.6. Метод определения выходных параметров

Каждое из свойств критичных элементов конструкции, обеспечивающих условие безотказного функционирования, должно быть по возможности выражено **параметром** физической величины (общей в качественном отношении многим физическим объектам, но в количественном отношении индивидуальной для каждого объекта). Каждый такой параметр должен однозначно характеризовать ожидаемое свойство и быть удобным для расчётов и экспериментального определения численных значений. При описании некоторых свойств могут быть использованы несколько выходных параметров, например для характеристики свойства прочности X_σ обычно используют локальные напряжения σ , зависящие от действующих нагрузок N [28]:

$$X_\sigma = \sigma(N). \quad (15)$$

Для простейших сочетаний типов конструктивных элементов и нагрузений выражение (15) может быть записано в виде

$$\sigma = \lambda N, \quad (16)$$

где λ – коэффициент, зависящий от размеров поперечного сечения конструктивных элементов, например для растягиваемого стержня $\lambda = 1/F$, для изгибаемой балки $\lambda = \alpha l/W_z$, для скручиваемого стержня $\lambda = 1/W_k$ и т. д.; здесь F – площадь поперечного сечения; α – коэффициент, зависящий от условий закрепления балки и нагрузки; l – длина балки; W_z – момент сопротивления сечения балки при изгибе; W_k – момент сопротивления сечения стержня при кручении [29].

Для сложных напряжённых состояний (при совместном действии нормальных и касательных напряжений) при определении действующих напряжений σ (16) используют один из четырёх критериев предельного напряжённо-деформированного состояния (механической теории прочности) [30].

Исходя из конкретного исполнения конструкции изделий и условий применения, дополнительно к уравнению (15) или (16) в общем случае могут быть рассмотрены выходные параметры прочности, характеризующие, например:

- циклическую прочность $X_{ц}$;
- накопление пластических деформаций $X_{пл}$;
- ползучесть $X_{п}$;

- контактные напряжения Герца X_H ;
- устойчивость X_y ;
- условия нераскрытия (плотности) стыка в соединениях с предварительной затяжкой болтов $X_{ст}$ и иные предельные состояния прочности, с учётом, например ортотропии теплофизических и механических свойств композиционных материалов.

Множество выходных параметров прочности $X_{пр}$ (в виде напряжений, внутренних критичных нагрузок, деформаций и т. п.) соотносится с выражением (1) следующим образом

$$X_{пр} = \{X_{\sigma}, X_{\tau}, X_{пл}, X_{п}, X_H, X_y, X_{ст}, \dots\} \subseteq X,$$

где $X_{\sigma}, X_{\tau}, X_{пл}, X_{п}, X_H, X_y, X_{ст}, \dots$ – соответственно, указанные выше и иные возможные параметры прочности, место которых обозначено многоточием.

В том случае, если ожидаемое свойство критичного элемента невозможно выразить параметром физической величины (например, из-за множественности неочевидных физических процессов, происходящих внутри критичных элементов), необходимо определить показатель, характеризующий вероятность обеспечения данного свойства на основе информационной модели в виде чёрного ящика (9) – (10), либо с помощью логико-вероятностной функции, заданной на двухэлементном множестве $\{0,1\}$ и принимающей значения в том же множестве (символом 0 обозначается ложное высказывание, а символом 1 – истинное):

$$P_i = \begin{cases} 1 & \text{событие, способное вызвать отказ не произошло} \\ 0 & \text{событие, способное вызвать отказ произошло.} \end{cases} \quad (17)$$

Функция (17) описывает модель отказов по схеме «события–проверки» и отражает принцип спорадичности осуществления событий, когда меры по предупреждению отказов подчиняются методам алгебры логики [14].

Примерами отказов, подчиняющихся информационной модели по схеме «чёрный ящик», могут быть несрабатывания пирочек, выход из строя ЭРИ, внезапные отключения или невключения электромеханических устройств и иные отказы, характеризующие статистический характер случайных событий. Примерами отказов, подчиняющихся схеме «события–проверки», служат любые спорадические события, приводящие к нарушению требуемых функций, которые могут быть предупреждены с помощью профилактических мер, например, – это отказы изделий однократного срабатывания из-за дефектов окончательной сборки (предупреждаются при выполнении сборочных операций в режиме «особо ответственных операций»), возникновения внезапных препятствий на пути движения (исключаются путём компьютерного моделирования предельных состояний

подвижных элементов), внезапных изменений трибологических характеристик кинематических пар (устраняются защитными приспособлениями, в частности – пыльниками, предохраняющими радиальные зазоры от попадания пыли), самоотвинчивания резьбовых соединений (предотвращаются контрольными элементами, которые препятствуют вибрационным перемещениям) и т. д.

Выбор параметров или показателей вероятностей для описания требуемых функций производится исходя из представлений и пониманий конструкторами физическо-химических процессов, происходящих при функционировании в конструируемых ими объектах.

Пример определения выходных параметров. Предположим, что ожидаемые свойства системы отделения, могут быть выражены следующими параметрами или показателями:

1) свойство конструктивных элементов механизмов (влияющих на срабатывание) обеспечить **прочность** в процессе и после действия нагрузок и воздействий в стартовом положении КА может быть выражено как частный случай, например **параметром** X_{σ} (15) (если нет необходимости учитывать иные предельные состояния прочности $X_{ц}, X_{пл}, X_{п}, X_{н}, X_{у}, X_{ст}$ и т. п.);

2) свойство сопряжённых элементов конструкции (влияющих на срабатывание) обеспечить **сохраняемость** функциональных характеристик после воздействия вибраций в стартовом положении КА, может быть выражено, например **показателем** $P_{в}$, который характеризует степень предохранения от самоотвинчивания резьбовых соединений и определяется как вероятность (17) при условии применения соответствующих нормативно-технологических методов;

3) свойство мест контакта конструкции системы отделения с концевыми выключателями обеспечить **деформации**, не допускающие самосрабатывания из-за несанкционированного разрыва электрических цепей – **параметром** $\Delta_{д}$, определяющим амплитуду деформаций конструкции в контактной зоне при действии вибрационных нагрузок;

4) свойство электрокабеля и токопроводящих соединений обеспечить **прохождение** электросигнала на пирочеки – **показателем** $P_{сп}$, который определяет вероятность безотказной работы ЭРИ (10) с учётом (14) при использовании резервирования электропитания токоведущих элементов;

5) свойство пирочек обеспечить **иницирование** процесса срабатывания механизмов – **показателем** $P_{пп}$, который определяют как вероятность (9) на основе статистических испытаний пирочек;

6) свойство исполнительных элементов механизмов обеспечить **энергодостаточность** для реализации процесса срабатывания замков зачекочки – **параметром** $M_{дв}$, который служит для обоснования выбора энергии приводов;

7а) свойство конструкции обеспечить **беспрепятственное** перемещение частей механизмов при срабатывании – **показателем** $P_{б}$, который определяют как вероятность (17) при условии отсутствия препятствий на пути перемещения подвижных частей;

7б) свойство установочных элементов системы отделения обеспечить **разделение** КА без заклиниваний при тепловых воздействиях – **параметром** $A_{д}$,

определяющим зазоры в установочных элементах, которые не стесняют совместные температурные деформации системы отделения с КА в плоскости стыка;

8) свойство толкателей обеспечить **разведение** отделяемых частей на безопасное расстояние – **параметром** $E_{пр}$, определяющим энергию пружин толкателей;

9) свойство электрокабеля и токопроводящих соединений обеспечить **прохождение** электросигнала от концевого выключателя к бортовому комплексу управления – **показателем** $P_{су}$, который определяют вероятностью безотказной работы ЭРИ (10) с учётом (14) при использовании резервирования электропитания токоведущих элементов.

На основании приведённого примера функциональность (1) системы отделения КА может быть определена следующим параметрами и показателями:

$$X = \{X_{\sigma}, P_{в}, \Delta_{д}, P_{сп}, P_{пп}, M_{дв}, P_{б}, A_{\Delta}, E_{пр}, P_{су}\}. \quad (18)$$

РАЗДЕЛ 3. МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ КОНСТРУКЦИИ

3.1. Сценарии проведения анализа (оценки) работоспособности и надёжности

В зависимости от способа выражения функциональности (1) через выходные параметры и вероятностные показатели конструктивных элементов существует два сценария проведения анализа (оценки) работоспособности и надёжности изделий.

Первый сценарий. Функциональность (18) может быть определена аналогично (11) с помощью единственного показателя – оценочной вероятности безотказной работы $X = \hat{P}_{co}$, которая характеризует выполнение всех требуемых функций по отделению КА при описании системы отделения с помощью информационной модели в виде чёрного ящика. Нижнюю доверительную границу оценки показателя безотказной работы системы отделения определяют по формуле¹² [31]

$$\hat{P}_{co} = (1 - \gamma)^{1/n},$$

где γ – доверительная вероятность; n – число однородных независимых испытаний для подтверждения заданной надёжности.

Работоспособность системы отделения в этом случае находят аналогично (12):

$$D_x = \hat{P}_{co} > P_{T3}, \quad (19)$$

где P_{T3} – допустимое значение вероятности, которое задаётся в техническом задании на разработку системы отделения.

Надёжность системы отделения определяют исходя из выражения (13):

$$R = P(\hat{P}_{co} > P_{T3}). \quad (20)$$

Физический смысл формул (19) и (20) следует понимать следующим образом. Выражение (19) говорит о том, что система отделения, которую изготавливают серийно, соответствует техническому состоянию, при котором *значения всех параметров, характеризующих способность выполнять заданные функции, соответствуют конструкторской документации.* В этом случае оценка показателя \hat{P}_{co} с доверительной вероятностью γ интегрально характеризует значения всех параметров, входящих в выражение (18), как способность выполнять заданные функции (при этом расчёты отдельных параметров работоспособности могут проводиться, а могут не проводиться на усмотрение разработчика). Однако на практике при изготовлении конкретной системы отделения некоторые из параметров (18) могут быть не достигнуты из-за спорадического нарушения условий *бездефектного производства* (например, не выполнены требования

¹² В ГОСТ РО 1410-001, Приложение И приводится другая формула: $\hat{P}_{co} = (1 - \gamma)^{1/(n+1)}$.

чертежа или не соблюдена технология сборки). Соответственно, условие (20) может оказаться не выполненным, несмотря на статистически обоснованный показатель \hat{P}_{co} (не учитывающий в полной мере спорадичность отклонений выборочной совокупности элементов). Для обеспечения заданной надёжности необходимо привести доказательство того, что условия безотказного производства при изготовлении системы отделения окажутся выполненными (в частности, требования чертежа выполнены и технология сборки соблюдена), для чего на производстве используют одну из систем менеджмента качества, например на основе стандартов ISO серии 9000.

Второй сценарий. При конструировании системы отделения само по себе оценочное значение вероятности безотказной работы \hat{P}_{co} , основанное на статистических данных (если существует возможность получить их на практике) абсолютно бесполезно для принятия и обоснования конструкторских решений. В итоге, как показывает практика эксплуатации механизмов раскрывающихся конструкций КА [6], при использовании современных методик расчётно-экспериментального обеспечения надёжности [32–35], безотказность вряд ли будет не выше 0,999. В качестве альтернативы можно использовать обобщённую параметрическую модель функционирования (2) – (3) для определения работоспособности и надёжности при конструировании, позволяющую выявлять выходные параметры и их допустимые значения, которые способны привести к критическим видам отказов и по совокупности – к интегральному отказу системы. В этом случае каждое конструкторское и технологическое решение должно быть принято исходя из обоснованных значений выходных параметров, которые обеспечивают выполнение объектом требуемых функций, и, в конечном итоге, – служебного назначения – задачи, для решения которой он создаётся.

3.2. Подходы к установлению работоспособности

Выражение (18) определяет наличие и набор выходных параметров (показателей), которые характеризуют работоспособность и надёжность конструкции системы отделения КА.

Значения каждого показателя ($P_v, P_{сп}, P_{пп}, P_б, P_{cy}$) определяют на основе моделей функционирования конструктивных элементов (9) – (10) или (17). Исходные данные для расчётов берут из технических условий на изделие, например на пирочеки, либо из справочных материалов по надёжности, например на ЭРИ [36]. При использовании функции, заданной на двухэлементном множестве (14), выполняют «*построения, по возможности, полной группы «событий–проверок» с последующим компьютерным*

моделированием этих цепочек на предмет вероятности упущения какой-либо проверки и оценке её последствий» [14].

Значения каждого из выходных параметров системы отделения ($X_\sigma, \Delta_d, M_{дв}, A_\Delta, E_{пр}$) определяют известными методами инженерных дисциплин – теории машин и механизмов, теоретической механики, сопротивления материалов, строительной механики, деталей машин и т. д., на основе данных конструкторской документации (проектной или рабочей).

Пример установления работоспособности (2) системы отделения на основе её функциональности согласно (18):

$$X_\sigma < X_{доп(\sigma)}; \quad (21)$$

$$P_v = \begin{cases} 1 & \text{все резьбовые соединения законтрены} \\ 0 & \text{не законтрено хотя бы одно соединение;} \end{cases} \quad (22)$$

$$\Delta_d < \Delta_{доп(d)}; \quad (23)$$

$$P_{сп} > P_{доп(сп)}; \quad (24)$$

$$P_{пп} > P_{доп(пп)}; \quad (25)$$

$$M_{дв} > M_{доп(дв)}; \quad (26)$$

$$P_6 = \begin{cases} 1 & \text{нет препятствий на пути перемещения} \\ 0 & \text{препятствий на пути перемещения возможно;} \end{cases} \quad (27)$$

$$A_\Delta > \Delta_{доп(\Delta)}; \quad (28)$$

$$E_{пр} > E_{доп(пр)}; \quad (29)$$

$$P_{су} > P_{доп(су)}, \quad (30)$$

где $\mathcal{P}_{доп(*)}$ – допустимые значения параметров (показателей) \mathcal{P} , соответствующих параметрам (показателям) с индексом в круглых скобках.

3.3. Задачи расчёта работоспособности

Выражение работоспособности системы отделения сводится к двум задачам:

- проведение расчётов значений соответствующих параметров (показателей) – определение левой части неравенств (21)–(30);
- установление критериев оценки достоверности расчётов – определение правой части указанных неравенств.

Решение первой задачи основано на определении значений параметров конструкции, которые способны обеспечить выполнение требуемых функций и характеризуют работоспособность и надёжность изделия, причём для их выполнения в чертежах должны быть установлены все необходимые и достаточные требования для изготовления и контроля на производстве. Под расчётом в данном случае понимают не только вычисления значений параметров на основе математических формул (которые называют инженерными расчётами), но и проверку разного рода гипотез, основанных на учёте каких-либо объективных обстоятельств (аналогично методу парирования отказов), например для определения вероятностных показателей по схеме «событий–проверок» (22) и (27).

Параметры (показатели), определяемые в результате таких расчётов характеризуют сопротивляемость конструкции внешним воздействиям и предназначены для соотнесения с допустимыми значениями.

Решение второй задачи связано с воздействием факторов внешней среды, которые в сочетании с режимами функционирования изделий, способны ограничить значения параметров работоспособности и снизить надёжность. Для решения этой задачи необходимо разделять понятия «режимы и условия применения» (используемыми в ГОСТ 27.002), которые, с одной стороны, являются важнейшими и определяющими понятиями надёжности, а, с другой стороны, недостаточно освещены в нормативной документации и в научно-технической литературе (по крайней мере, терминологически).

3.4. Понятие режимов и условий применения

Дефиниции «режим» и «условия» имеют близкие, но различные по смыслу значения. Под *режимом* применения можно понимать условия, которые присущи техническому объекту независимо от того, наблюдаются какие-либо внешние воздействия либо эти воздействия отсутствуют. В то же время, согласно ГОСТ 26883 под *внешними воздействующими факторами* понимается совокупное воздействие явлений, процессов или среды, внешних по отношению к изделию или его составным частям, которые вызывают или могут вызвать ограничение или потерю работоспособного состояния изделия в процессе эксплуатации. Таким образом, при функционировании следует различать *внутренние условия*, присущие объекту (локализованные в нём), и *внешние условия*, навязанные окружающими средой по границам интерфейсов.

Внутренние условия соответствуют исключительно режимам применения исследуемого объекта и являются следствием воздействия на него, как правило, антропогенных факторов до начала эксплуатации. Эти факторы порождаются людьми при проектировании, конструировании, выборе и использовании технологий, изготовлении, техническом контроле и приёмочных испытаниях, к их числу относятся, например алгоритмы функционирования, структура и конструкция технического объекта, процедуры сборки, настройки и регулировки механизмов, состояние объекта после изготовления, факторы технологической наследственности и т. п. Режимы относятся к внутреннему состоянию изделия при эксплуатации – организации и установленному порядку функционирования, а условия – к внешней среде, навязанной изделию извне. Сочетание режимов и условий эксплуатации характеризует предопределённую способность изделия к функционированию.

Внешние условия соответствуют совокупному действию режимов применения внешних технических объектов (техногенным факторам) и факторов природной среды относительно интерфейсов исследуемого объекта.

При функционировании КА примерами режимов и условий применения могут служить следующие явления:

- режимы (внутренние условия) – это ударные нагрузки при срабатывании пиротехнических устройств замков зачехловки, процессы развёртывания складных конструкций, включая динамические нагрузки при фиксации в рабочем положении, тепловыделение приборов, жёсткость конструкции (частота собственных колебаний) и пр.;
- внешние условия – это вибрации ракетных двигателей (режим их работы), динамические воздействия в результате расцепки ступеней ракеты-носителя (режимы переходных процессов), ударные нагрузки при отделении от ракеты-носителя (режимы отделения), действие факторов космического пространства (природная среда космоса) после сброса головного обтекателя и пр.

Значения выходных параметров функционирования от раздельного действия режимов и условий применения при их взаимном влиянии друг на друга изменяются следующим образом:

1) суммируются, например, если на элементы конструкции действует статическая нагрузка (например усилие предварительного натяжения сетеполотна, которое служит для формирования отражающей поверхности рефлектора либо в качестве упругой подложки для фотопреобразователей солнечной батареи), то напряжения и деформации от неё складываются с соответствующими значениями напряжений и деформаций от действия квазистатических, вибрационных и ударных нагрузок, например согласно принципу суперпозиции, широко известному в механике деформируемого твёрдого тела [30];

2) резко возрастают при резонансах, например, когда частота подвески навесной конструкции совпадает или находится в близкой области с частотой внешнего динамического воздействия (при вибрациях активного участка полёта и ударах в момент разделения ступеней ракеты-носителя и КА), в частности амплитуды вынужденных колебаний относительно статических отклонений увеличиваются пропорционально коэффициенту динамичности β

$$\beta = \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{p^2}\right)^2 + \left(\frac{\delta}{\pi}\right)^2 \left(\frac{\omega}{p}\right)^2}},$$

где ω – частота возмущения; p – собственная частота колебаний; δ – логарифмический декремент; π – математическая константа, приблизительно равная 3,14;

3) увеличиваются скачкообразно, например внутреннее давление в герметичных ёмкостях из-за резкого падения атмосферного давления или момент сил сопротивления в шарнире при попадании в радиальный зазор минеральных частиц пыли из атмосферы, в частности внутреннее давление в ёмкости с учётом закона Шарля (второго закона Гей-Люссака) равно

$$P_y = \frac{T_y}{T_p} (P_p + \Delta P)$$

где P_y , T_y – внутреннее давление и температура, соответствующие внешним условиям космического пространства; P_p , T_p – внутреннее давление и температура, соответствующие режимам эксплуатации, которые принимаются равными внутреннему давлению и температуре газа при заправке ёмкости; ΔP – перепад внешнего давления при полёте ракеты-носителя;

4) уменьшаются, например запас движущего момента привода при аномально низкой температуре окружающей среды из-за увеличения трения твёрдо-смазывающего покрытия в шарнире и жёсткости оплётки транзитного электрического кабеля;

5) меняются из-за изменения геометрии, например эластичные или неэластичные гибкие элементы (экранно-вакуумная теплоизоляция, электрические кабели) в условиях невесомости изменяют свои динамические размеры (здесь режим применения – это сборка в условиях земной гравитации, а внешние условия применения – микрогравитация, приводящая к потере веса);

6) меняются из-за нарушения настроек и регулировок, например из-за изменения относительного положения деталей в механизме при действии невесомости или вибрации (в данном случае режим – это технологические режимы сборки, а внешние условия – вибрации активного участка полёта и невесомость);

7) меняются из-за вибрационных перемещений, например самоотвинчивание резьбовых соединений при вибрациях (здесь режим – это способ стопорения, а внешние условия – вибрации активного участка полёта);

8) меняются из-за изменения адгезии, например при образовании фреттинг-коррозии кинематических пар в условиях высоких контактных давлений (режим), что способно привести к холодной сварке в вакууме (внешнее условие).

Сочетание факторов режимов и условий применения является одной из важнейших процедур при проведении анализа надёжности изделий с малой вероятностью отказов, где важны знания, опыт, квалификация и, как это ни покажется странным, воображение инженера, проводящего анализ (способность представить, как могли бы развиваться

события при функционировании в худшем случае воздействия режимов и условий применения).

Пример определения критериев для оценки достоверности расчётов параметров системы отделения. По параметру прочности X_σ (21) при расчётах локальных напряжений (15) или (16) критерием расчётов, как правило, являются допустимые напряжения по пределу текучести σ_T или по пределу прочности (временному сопротивлению) σ_B , в зависимости от временного характера нагрузки (статического или динамического). Таким образом, условие (21) для эксплуатационных напряжений σ^3 (без учёта коэффициентов безопасности, но с учётом соответствующих запасов прочности μ_T или μ_B) определяют следующим образом: $\sigma^3 \leq \left\{ \frac{\sigma_T}{\mu_T}, \frac{\sigma_B}{\mu_B} \right\}$ (на основании чего производят выбор конструктивных материалов и размеров строительных сечений конструктивных элементов).

Критериями выполнения условий (22) и (27) по определению является безусловная реализация желаемых событий, при которых $whp P \equiv 1$, соответственно, обеспечивается сохраняемость характеристик после воздействия вибраций и отсутствие препятствий на пути перемещения подвижных частей механизмов при срабатывании замков зачековки.

Критерием выполнения условия (23) является ход штока концевых выключателей, который при максимальных амплитудах деформаций Δ_d конструкции в точке касания не должен приводить к самосрабатыванию выключателей.

Критериями выполнения условий (24)–(25) и (30) служат допускаемые вероятности безотказной работы $P_{доп}$ критичных элементов, которые с учётом их резервирования могут быть определены аналогично (12).

Критерием выполнения условия (26) является момент сил сопротивления M_c в подвижных узлах механизмов при срабатывании замков, который определяют для худшего случая – при пониженной температуре внешней среды, когда трибологические характеристики смазок в кинематических парах и резистивные сопротивления изгибу (скручиванию) полимерной оплётки электрических кабелей максимальны.

Критерием выполнения условия (28) является недопустимость заклинивания опорных узлов КА на системе отделения, что достигается тем, что зазоры в соединительных элементах при любых сочетаниях технологических допусков A_Δ должны быть больше значений совместных тепловых деформаций $\Delta_{ТД}$ системы отделения и КА в плоскости стыка с ракетой-носителем [6].

Критерием выполнения условия (29) является минимально допустимая энергия пружин $E_{мин}$, обеспечивающая заданные линейные и угловые скорости отделения КА, которые установлены в техническом задании $E_{ТЗ}$.

3.5. Расчёты параметров работоспособности

В общем виде номенклатура расчётов работоспособности и надёжности изделий машиностроения (в зависимости от стадии разработки) приведена в ОСТ 92-0290, где каждому расчёту присвоен код в виде трёхзначного сочетания, состоящего из буквы «Р» и двух арабских цифр: P01, ..., P23. Например, P03 – расчёт внешних нагрузок, P05 – расчёт

динамический, P12 – расчёт надёжности, P14 – расчёт на прочность, P15 – расчёт размерных цепей и т. д.

Все расчёты проводят исходя из параметров конструкции (геометрических размеров и характеристик применяемых материалов), режимов используемых технологий изготовления и других ограничений, которые уточняют служебное назначение изделий в состоянии «как они есть» на каждом этапе жизненного цикла. Как правило, выбор методик расчётов параметров работоспособности определяется опытом и предпочтениями расчётчиков (причём на практике методики нормируются редко). С развитием цифровых технологий, программные пакеты для проведения мультидисциплинарных CAE- и HPC-расчётов (расчёты прочности, оптимизации, теплообмена, динамики, колебаний, вибрации, ударов, электромагнетизма, CFD-расчёты и т. п.) предлагаются разработчикам технических систем как готовый продукт. Использование таких программных пакетов для проведения технических расчётов, с одной стороны, удобно для практического использования, но, с другой стороны, способно привести к ошибкам из-за того, что пользователи не вдаются в тонкости составления конечно-элементной модели, по умолчанию полагаясь на алгоритмизированные процедуры программных продуктов [37]. В частности, численные расчёты методом конечных элементов сами по себе не делают результаты расчётов релевантными и достоверными, если они не прошли процедур верификации исходных данных и валидации результатов вычислений [6]. Важную роль для снижения ошибок в расчётах играет формализация их результатов в виде конструкторских документов – расчётов (документов, содержащих расчёты параметров и величин). Тем не менее практически не существует общепринятых стандартов представления расчётов, например, из множества установленных в ОСТ 92-0290 видов расчётов, в ракетно-космической отрасли, пожалуй, лишь для P14 существует установленный порядок разработки и оформления расчёта согласно ГОСТ Р 56514, Приложение А (справочное).

Примеры расчётов работоспособности системы отделения. Делая скидку на некоторую условность примеров (из-за отсутствия конкретики конструктивного исполнения), расчёты системы отделения тем не менее имеют определённую закономерность подходов.

Расчёты на прочность (21) во многом предопределяются расчётами нагрузок (согласно ОСТ 92-0290 – это расчёт внешних нагрузок P03). При расчётах нагрузок определяют их эксплуатационные значения на этапах эксплуатации КА в составе ракеты-носителя, которые характеризуются действием значительных продольных и боковых перегрузок [38] (старт, полёт в плотных слоях атмосферы, разделение ступеней, конец работы маршевых двигателей). Расчёт на прочность проводят исходя из направления и характера действия внешних нагрузок, мест их приложения, расчётных случаев (экстремальных условий эксплуатации) и расчётных схем (упрощений конструкции с сохранением существенных особенностей объектов,

определяющих их поведение под нагрузкой). Целью расчётов на прочность системы отделения с позиций надёжности является в конечном итоге выполнение требуемых функций по отделению КА.

Выполнение условий (22), (24)–(25), (27) и (30) требуют, с одной стороны, расчётов допустимых значений показателей безотказности составных частей, обеспечивающих выполнение заданных требований к безотказности изделия в целом, например методом пропорционального распределения по ОСТ 1 00448, а, с другой стороны, – расчётов или оценок самих показателей вероятности, которые имеют свои особенности, в частности, для выполнения условий:

- (22) проводят определение критических мест в конструкции, где возможно возникновение **вибрационных перемещений** – подвижности под действием вибрации номинально неподвижных деталей машин [39], которые способны привести к самоотвинчиванию резьбовых соединений, нарушению настроек и регулировок механизмов, после чего конрят места соединений по ОСТ 92-1542 и обеспечивают соответствующий технический контроль её осуществления;

- (24) и (30) проводят расчёт надёжности электрокабелей (как ЭРИ) по справочным данным исходя из значений базовых интенсивностей отказов, рассчитанных по результатам статистических испытаний на безотказность, долговечность и ресурс с учётом коэффициентов, которые определяют исходя из изменений эксплуатационной интенсивности отказов в зависимости от факторов внешней среды (для электрокабелей расчёты проводят по материалам [36], приведённым на стр. 7–17, 539–576, 599);

- (25) используют результаты статистических испытаний (9), которые обычно вносят в технические условия на пирочеки (данные таких статистических испытаний должны нарабатываться вновь при смене каждого изготовителя пирочек);

- (27) проводят анализ группы «событий–проверок» на отсутствие препятствий на пути перемещения подвижных частей механизмов при срабатывании замков зачеховки, в т. ч. проверок на отсутствие соударений, углов выхода элементов КА, заглубленных в устройство отделения, конструктивных элементов, которые в условиях вибраций и микрогравитации способны изменять динамические размеры и тем самым перекрывать траектории движения отделяемых элементов, и т. д.

Для выполнения условия (23) делают расчёт перемещений при вибрационном нагружении конструкции системы отделения либо проводят вибрационные испытания (яркий пример и последствия невыполнения указанного условия приведён в книге [40]).

Расчёты в обеспечение условия (26) проводят для определения значений моментов сил сопротивления M_c в замковых устройствах, как правило, в начальной фазе срабатывания, когда движущие силы минимальные, а силы сопротивления максимальные. Многочисленные примеры определения движущих моментов (сил) в системах отделения приведены в работах [32–34]. Движущий момент $M_{дв}$ (движущие силы) для механических приводов определяют из расчёта пружин [34], при этом учитывают податливость мест крепления пружин [6].

Расчёты по выполнению условия (28) включают расчёты размерных цепей [41] по определению зазоров в опорных узлах КА на системе отделения по формулам:

$$A_{\Delta} = \sum_{j=1}^n \vec{A}_j - \sum_{j=1}^m \overleftarrow{A}_j,$$

$$A_{\Delta}^{\text{макс}} = \sum_{j=1}^n \overrightarrow{A_j^{\text{макс}}} - \sum_{j=1}^m \overleftarrow{A_j^{\text{мин}}},$$

$$A_{\Delta}^{\text{мин}} = \sum_{j=1}^n \overrightarrow{A_j^{\text{мин}}} - \sum_{j=1}^m \overleftarrow{A_j^{\text{макс}}},$$

где A_{Δ} , $A_{\Delta}^{\text{макс}}$, $A_{\Delta}^{\text{мин}}$ – номинальные, максимальные и минимальные размеры звеньев, n , m – число увеличивающих и уменьшающих звеньев размерной цепи, а также расчёты совместных тепловых деформаций закрепляемой конструкции (КА) и опорного основания (системы отделения) [6].

Расчёты в обеспечение выполнения условия (29) проводят с учётом следующих факторов:

- угловых скоростей разгонного блока на момент отделения;
- разброса усилий пружин и их расположения;
- разброса масс и моментов инерции КА и разгонного блока;
- эксцентриситетов центров масс КА и разгонного блока;
- равномерности срабатывания замков системы отделения;
- резистивных сил, препятствующих отделению КА.

Примеры расчёта параметров отделения КА приведены в работах [32–34].

РАЗДЕЛ 4. МЕТОДИКА РАСЧЁТА НАДЁЖНОСТИ

4.1. Подход к расчёту надёжности

При конструировании, в первую очередь с применением цифровых технологий, удобно использовать конструктивные запасы – приём для достижения требуемой надёжности при отсутствии прототипов и, соответственно, статистических моделей поведения изделий в заданных режимах и условиях применения. Использование конструктивных запасов существенно упрощает выбор и обоснование параметров при конструировании. Смысл их применения – это обеспечить нахождение значений выходных параметров в допустимом диапазоне с приемлемым риском.

Рассмотрим вариант использования конструктивных запасов на примере обеспечения работоспособности (19) и надёжности (20) системы отделения с помощью оценочного показателя вероятности безотказной работы \hat{P}_{co} . Соблюдение условия (19) говорит о том, что требуемый показатель надёжности P_{T3} противостоит (сопротивляется) изменению стохастических параметров конструкции, технологической наследственности и внешних воздействий, которые интегрально обобщены оценочным значением показателя \hat{P}_{co} – своего рода нагрузкой (определяющей интегральную совокупность выходных параметров), которая стремится превысить требуемый уровень P_{T3} , заданный в техническом задании. Если возможные изменения значений всех параметров при эксплуатации не приведут к ухудшению оценочного статистического уровня вероятности, то условие (19) будет выполнено (т. е. значения всех параметров, характеризующих способность выполнять заданные функции, будут соответствовать требованиям конструкторской документации). Однако, если на производстве будут нарушены условия бездефектного производства, то условие (20) может оказаться невыполненным. Например, авария при разделении ступеней космического корабля «Союз МС-10» в 2018 г. произошла из-за спорадического дефекта, который возник вследствие нарушения технологии сборки при монтаже разгонного блока первой ступени со второй ступенью ракеты-носителя «Союз-ФГ». Исключить подобного рода нарушения при проведении сборочных операций возможно, если выполняемые технологические операции будут иметь статус «особо ответственных операций» или «наиболее сложных операций» по ГОСТ Р 56526. В этом случае требования к проведению работ выделяют в технической (конструкторской, технологической и эксплуатационной) документации особым шрифтом или цветом, что указывает на необходимость повышенного внимания и тройного контроля (со стороны рабочих, производственного мастера и контролёра) при выполнении сборочных операций в т. ч. с помощью технической

фото- и видеосъёмки. Особый статус сборочных операций, закреплённых определённым образом в технической документации, является ничем иным, как **конструктивным запасом** (в виде требований к выполнению работ сверх минимально необходимых), предусматривающим установленный порядок проведения сборки, который способен обеспечить выполнение требуемой надёжности, когда $R = \hat{P}_{co} > P_{T3}$.

Видов конструктивных запасов может быть множество, однако, их сущность в общем виде можно пояснить с помощью хорошо известных гауссовых кривых (кривых нормального распределения), описывающих нагрузку N и сопротивление (прочность) T . Обеспечение надёжности в модели отказов по схеме «нагрузка–сопротивление» с использованием конструктивных запасов может достигаться тремя способами – максимально возможным разнесением математических ожиданий параметров сопротивления m_T и нагрузки m_N , снижением коэффициентов вариации нагрузки $V_N = \sigma_N/m_N$ или сопротивления $V_T = \sigma_T/m_T$, здесь σ_N и σ_T – среднеквадратические значения нагрузки и сопротивления. В указанном выше случае использования статуса «особо ответственной операции» надёжность обеспечивается путём снижения коэффициента вариации нагрузки за счёт уменьшения вероятности совершения ошибок при сборочных операциях.

Наиболее известными примерами конструктивных запасов в инженерии являются коэффициенты безопасности и запасы прочности, позволяющие варьировать параметрами нагрузки и сопротивления (матожиданиями и среднеквадратическими отклонениями) исходя из правил статистической теории надёжности. Значения коэффициентов безопасности и запасов прочности обычно нормируют для различных типов изделий и условий нагружения, например по ГОСТ Р 56514. Если нормированных значений коэффициентов безопасности и запасов прочности при расчётах на прочность не существует, например для конструкций из композиционных материалов, то для их установления можно использовать подходы, учитывающие коэффициенты вариации внешних нагрузок и сопротивления материалов, которые изложены в работах [42–44].

Кроме указанных примеров, на практике используют конструктивные запасы в виде резервирования, запасов движущих моментов (сил), параметрической избыточности, силовых и температурных развязок, процедур получения гарантированных результатов, например с применением минимаксных критериев или с использованием факторов инженерной психологии, которые приведены в работах [6, 15]. Все конструктивные запасы назначают исходя из правил статистической теории надёжности (например, коэффициенты безопасности и запасы прочности), подтверждённой практики применения (например, запасы движущих моментов (сил) [6, 21–23, 32–34]), конструктивных приёмов,

направленных на снятие ограничений по изменению выходных параметров (например, путём использования силовых и температурных развязок [6]) или иных организационно-технических действий, снижающих либо исключаящих вероятность возникновения отказов.

Пример выбора конструктивных запасов для системы отделения. Для обеспечения надёжности системы отделения КА условия (21)–(30) могут быть записаны в следующем виде:

$$f\lambda N/\mu \geq [\sigma]; \quad (31)$$

$$P_b = 1 \quad \text{при условии, что все резьбовые соединения законтрены}; \quad (32)$$

$$\Delta_d \ll h; \quad (33)$$

$$[1 - (1 - P_{cn})^{p+1}] \geq P_{\text{доп}(cn)}; \quad (34)$$

$$[1 - (1 - P_{np})^{p+1}] \geq P_{\text{доп}(np)}; \quad (35)$$

$$M_{дв} > kM_c; \quad (36)$$

$$P_6 = 1 \quad \text{при условии, что нет препятствий на пути перемещения}; \quad (37)$$

$$A_{\Delta}^{\text{мин}} > \Delta_3^{\text{макс}}; \quad (38)$$

$$E_{np}^{\text{мин}} > E_{тз}; \quad (39)$$

$$[1 - (1 - P_{cy})^{p+1}] \geq P_{\text{доп}(cy)}, \quad (40)$$

где $[\sigma]$ – допустимые значения локальных напряжений; h – ход штока концевых выключателей.

При составлении условий (31)–(40) использованы следующие конструктивные запасы:

- коэффициенты безопасности и запасов прочности – (31);
- статус «особо ответственная операция» при выполнении сборочных работ – (32);
- снятие ограничений на выходные параметры в результате того, что концевой выключатель установлен максимально близко к опорному узлу, а его шток выполнен длинноходовым – (33);
- функциональное резервирование схемы подачи электропитания – (34) и (40);
- структурное резервирование пирочек – (35);
- запасы движущих моментов (36);
- процедуры получения гарантированных результатов путём анализа группы «событий–проверок» на отсутствие препятствий на пути перемещения подвижных частей механизмов при срабатывании замков – (37);
- минимаксные критерии – (38)–(39).

4.2. Расчёт надёжности

С учётом применения методов сворачивания структуры надёжности (метода свёртки) и приведения параметров к согласованному безразмерному виду (когда границы области допустимых значений всех параметров и показателей ограничены интервалом $D_x \in [0,1]$) расчёт надёжности (3) сводится к аддитивным подсчётам вероятностей выполнения требуемых функций по известной формуле [45] (для последовательного соединения критичных элементов при гипотезе об их независимости в смысле надёжности)

$$R = \prod_{i=1}^n R_i. \quad (41)$$

Формула (41) фактически служит для определения теоретической надёжности по проектным параметрам (т. е. способности конструкции обеспечить надёжность) и характеризует результат проведения *бездефектного проектирования*.

Пример расчёта надёжности системы отделения. Расчёт надёжности проводят с учётом выполнения условий работоспособности (21)–(30) исходя из обеспечения конструктивных запасов (31)–(40):

$$R_{\sigma} \approx 1 \quad \text{при обеспечении } f \geq 1,3 \text{ и } \mu \geq 1,0 \text{ [44];} \quad (42)$$

$$R_{\text{в}} = 1 \quad \text{при условии, что все резьбовые соединения законтрены;} \quad (43)$$

$$R_{\text{д}} \approx 1 \quad \text{при обеспечении } \Delta_{\text{д}} \ll h; \quad (44)$$

$$R_{\text{сп}} = [1 - (1 - P_{\text{сп}})^{p+1}]; \quad (45)$$

$$R_{\text{пп}} = [1 - (1 - P_{\text{пп}})^{p+1}]; \quad (46)$$

$$R_{\text{дв}} \approx 1 \quad \text{при обеспечении } k \geq 2,0 \text{ [6, 21];} \quad (47)$$

$$R_{\text{б}} = 1 \quad \text{при условии, что нет препятствий на пути перемещения;} \quad (48)$$

$$R_{\Delta} \approx 1 \quad \text{при обеспечении } A_{\Delta}^{\text{мин}} > \Delta_{\text{з}}^{\text{макс}}; \quad (49)$$

$$R_{\text{пр}} \approx 1 \quad \text{при обеспечении } E_{\text{пр}}^{\text{мин}} > E_{\text{тз}} \quad (50)$$

$$R_{\text{сy}} = [1 - (1 - P_{\text{сy}})^{p+1}]. \quad (51)$$

С учётом (41) надёжность системы отделения равна

$$R_{\text{со}} = R_{\sigma} \cdot R_{\text{в}} \cdot R_{\text{д}} \cdot R_{\text{сп}} \cdot R_{\text{пп}} \cdot R_{\text{дв}} \cdot R_{\text{б}} \cdot R_{\Delta} \cdot R_{\text{пр}} \cdot R_{\text{сy}}, \quad (52)$$

4.3. Оценка рисков невыполнения условий бездефектного производства

Оценка надёжности системы отделения (52) по проектным параметрам (на основе лишь конструкторской документации) не является окончательной, мало того, с высокой вероятностью она является неоправданно оптимистичной [46]. Соблюдение конструктивных запасов (31)–(40) и проведение расчёта надёжности (42)–(51) означает, что система отделения со значениями выходных параметров, соответствующих конструкторской документации, теоретически способна обеспечить требования к надёжности, заданные в техническом задании, т. е. $R_{\text{со}} > P_{\text{тз}}$, что следует рассматривать как выполнение условия обеспечения работоспособности (19). Для исключения (снижения) рисков отказов по результатам изготовления высоконадёжных изделий необходимо привести доказательства того, что анализ (оценка) надёжности соответствует условиям *бездефектного производства* (20), т. е.:

- конструкторская документация, по которой произведена оценка теоретической надёжности, без дополнительных толкований и разъяснений является понятной не только лицам, которые непосредственно занимаются изготовлением и техническим контролем на

производстве (лицам не имеющего прямого отношения к конструкторскому замыслу), но и третьим лицам (экспертам).

- в конструкторской документации установлены все необходимые и достаточные требования для изготовления, которые соответствуют условиям обеспечения конструктивных запасов (31)–(40) и расчётов надёжности по видам отказов (42)–(51);

- проведена проверка на соответствие требований конструкторской и технологической документации, например в случаях общей отсылки в чертежах к типовым технологическим процессам, где предусмотрена детализация выполнения технологических операций на усмотрение конструктора, такие требования должны быть в обязательном порядке установлены в чертежах;

- система менеджмента качества, принятая на производстве, позволяет изготовить изделия без отступлений от требований конструкторской и технологической документации;

- методы неразрушающего контроля и приёмочные испытания позволяют подтвердить требуемое качество ключевых характеристик изделия.

Для снижения рисков невыполнения условий бездефектного производства в методике конструкторско-технологического анализа надёжности предусмотрены процедуры оценки:

- релевантности выходных параметров требованиям конструкторской и технологической документации;

- рисков возникновения отказов вследствие неустановления необходимых и достаточных требований в конструкторской и технологической документации;

- выполнения требований надёжности с учётом влияния на надёжность производственно-технологических мероприятий по предупреждению отказов.

Примеры проведения оценки рисков невыполнения условий бездефектного производства рассмотрены в работах [6, 15, 46–48].

Пример оценки рисков невыполнения условий бездефектного производства. Оценку рисков проводят на основании конструкторской и технологической документации в состоянии «как она есть». Для каждой требуемой функции проводят оценку того, что каждому из параметров, который служит для обеспечения условий работоспособности (2) и надёжности (3), в конструкторской и технологической документации установлено соответствующее требование, которое на производстве или при эксплуатации должно быть выполнено и проконтролировано. Риски несоответствия параметров требованиям документации оцениваются экспертным путём с использованием балльных оценок критичности отказов по ГОСТ 27.310. В результате формулу (41) используют в виде

$$R(C_i) = \prod_{i=1}^n \alpha_i R_i, \quad (53)$$

здесь α_i – корректирующие коэффициенты, определённые для каждого составляющей формулы (52), которые могут быть получены экспертным путём, например с использованием балльных оценок критичности отказов:

$$\alpha_i = 1 - Q_i,$$

где Q_i – ожидаемая вероятность i -го вида отказа в формуле (52) согласно шкале балльных оценок критичности отказов по ГОСТ 27.310.

Оценку на соответствие выполнения требований технического задания для системы отделения проводят с учётом (53) по формуле

$$R(G_i) > P_{\text{тз}}. \tag{54}$$

В случае невыполнения условия (54) необходимо провести соответствующие мероприятия по предупреждению отказов с обеспечением условий бездефектного производства.

ВЫВОДЫ

Приведённый пример анализа (оценки) надёжности системы отделения КА показал, что методика конструкторско-технологического анализа надёжности позволяет проводить анализ (оценку) работоспособности и надёжности сложных технических систем, состоящих из компонентов, различных по своей природе и принципу действия: силовых конструкций, механизмов, электромеханических устройств, пиросредств, электрических узлов, электрорадиоизделий и электронных сборок. Функционирование таких технических систем может безразлично подчиняться физическим законам природы, статистическим закономерностям или логико-вероятностным моделям. Применение конструкторско-технологического анализа надёжности не отменяет ни одну из инженерных практик, но развивает и дополняет их, что даёт возможность:

- обнаруживать редкие причины возможных отказов;
- определять конструкторские и технологические риски возникновения отказов, которые традиционными методами верификации выявить невозможно;
- уходить от концепции случайности причин отказов и находить их логико-математической связь с конструктивно-технологическими факторами;
- устанавливать связь выходных параметров функционирования с вероятностью отказов;
- сокращать число потенциальных отказов конструкционного характера на ранних стадиях жизненного цикла и т. п.

Несмотря на то, что методика конструкторско-технологического анализа надёжности подразумевает оценку (расчёт) надёжности, в первую очередь её следует рассматривать как комплекс конструкторско-технологических и организационных мероприятий по исключению (снижению вероятности) отказов, основанный на анализе технической документации, который включает:

- постановку задач для расчётной верификации (проведение необходимых и достаточных расчётов параметров работоспособности и надёжности по заданным критериям для максимального снижения вероятности необоснованных рисков возникновения возможных отказов);
- постановку задач для экспериментальной верификации, включающих опытное определение значений параметров, которые не могут быть получены в результате расчётной верификации из-за отсутствия необходимых данных, и подтверждение требуемых параметров работоспособности при наземной экспериментальной отработке исходя из условия по ограничению объектов, поставляемых на испытания;

- установку необходимых и достаточных требований в конструкторской документации для изготовления и эксплуатации изделий;
- получение контрольного списка (чек-листа) выходных параметров конструкции, по которым проводится проверка качества и надёжности изделий;
- планирование мероприятий по предупреждению отказов конструкционного характера на всех стадиях жизненного цикла;
- итерационный подсчёт (калькулирование) прогнозируемой надёжности в результате проведения требуемых мероприятий по предупреждению отказов конструкционного характера;
- оценку конструкторско-технологических решений на соответствие заданным требованиям к надёжности.

Использование конструкторско-технологического анализа надёжности создаёт условия, при которых обеспечение надёжности становится естественной и неотъемлемой частью работы конструкторов, позволяющей принимать инженерные решения согласно заданным требованиям надёжности (а не в отрыве от них). При этом в отличие от анализа видов, последствий и критичности отказов (за рубежом – FMECA, в России – АВПКО), предназначенного для выявления и оценки критичности дефектов продукции, процессов или процедур, конструкторско-технологический анализ надёжности служит для верификации конструкторских решений с учётом заданных технологических ограничений (т. е. предотвращения самих причин возникновения возможных дефектов).

Методика конструкторско-технологического анализа надёжности была опробована при конструировании механических устройств одноразового срабатывания космического назначения и узлов гидроавтоматики технологического оборудования нефтяных скважин, что позволило обнаружить конструкторские и технологические ошибки в технической документации; произвести оценку эффективности существующей расчётно-экспериментальной отработки конструкции изделий; оценить достаточность установленных требований в конструкторской документации; выявить недопустимые сочетания параметров конструкций исходя из конструктивных ограничений, реальных условий изготовления и контроля; сделать выводы об отказоспособности изделий; произвести прогнозную оценку выполнения заданных требований к надёжности; выдать рекомендации по изменению конструкции для обеспечения заданной надёжности изделий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методика конструкторско-технологического анализа надёжности является универсальной процедурой аналитической верификации при конструировании технических объектов, которая позволяет выявлять возможные отказы на ранних стадиях жизненного цикла.

Экономическая эффективность использования методики конструкторско-технологического анализа надёжности определяется сокращением доработок изделий по результатам изготовления и наземной экспериментальной отработки, а также снижением числа отказов конструкционного характера при эксплуатации.

Помимо своего прямого назначения – анализа (оценки) уникальных высокоответственных систем (с безотказностью выше 0,999), конструкторско-технологический анализ надёжности может служить основой при решении целого ряда прикладных задач проектирования и конструирования технических объектов, например:

- 1) для анализа и оценки надёжности электронных сборок (радиоэлектронных средств);
- 2) при проектировании и конструировании прецизионных крупногабаритных консольных конструкций космического назначения;
- 3) при использовании цифровых технологий проектирования как процедура верификации цифровых моделей и валидации результатов итерационных циклов при разработке цифровых двойников;
- 4) как альтернатива FMECA при анализе надёжности уникальных высокоответственных систем;
- 5) для снижения стоимости расчётно-экспериментальной отработки изделий;
- 6) для контроля надёжности при планировании мероприятий по предупреждению отказов конструкционного характера;
- 7) как средство для самообучения инженеров.

Решение указанных задач определяет перспективу дальнейшего направления развития методики конструкторско-технологического анализа надёжности, что нашло отражение в работе [49].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дубовиков Б.А. Основы научной организации управлением качества (опыт применения и теоретические обоснования системы организации бездефектного труда). – М.: Экономика, 1966. – 321 с.
2. Сейфи И.Ф. Система КАНАРСПИ. Гарантия высокого качества / И.Ф. Сейфи, А.И. Ярошенко, В.И. Бакаев. – М.: Изд. стандартов, 1968. – 149 с.
3. Леон Р., Шумайкер А., Какар Р. и др. Управление качеством. Робастное проектирование. Метод Тагути. – М.: СЕЙФИ, 2002. – 384 с.
4. Hecht H. and Hecht M. Reliability prediction for spacecraft, Report prepared for Rome Air Development Center, no. RADC-TR-85-229, Dec. – 1985. – 156 p.
5. Горохова В.В. Применение Саратовской системы при проведении исследовательских и конструкторских работ. – М.: Изд. стандартов, 1969. – 105 с.
6. Похабов Ю.П. Теория и практика обеспечения надёжности механических устройств одноразового срабатывания: монография. – Красноярск: СФУ, 2018. – 340 с.
7. Stecklein J.M., Dabney J., Dick B. et al. Error Cost Escalation Through the Project Life Cycle // 14th Annual International Symposium; June 19, 2004 – June 24, 2004; Toulouse, France. – doi: 10.1002/j.2334-5837.2004.tb00608.x.
8. Space Vehicle Mechanisms – Elements of Successful Design, Edit-ed by Peter L. Conley. – NJ.: John Wiley & Sons, 1998. – 794 p.
9. Конструирование и расчёты / Г. Гедер. – СПб.: Изд-во К. Риккера, 1904. – 549 с.
10. Ушаков, И.А. Надёжность: прошлое, настоящее, будущее: пленарный доклад на открытии конференции «Математические методы в надёжности» (MMR–2000), Бордо, Франция, 2000 [Электронный ресурс] // Надёжность: Вопросы теории и практики (e-journal «Reliability: Theory & Applications»). – 2006. – № 1. – С. 17–27.
11. Половко А.М., Гуров С.В. Основы теории надёжности. – СПб.: БХВ-Петербург, 2006. – 704 с.
12. Марченко Б.И. Обеспечение надёжности технических систем. – СПб.: Нестор-История, 2016 – 88 с.
13. Новейший словарь иностранных слов и выражений. – М.: Современный литератор, 2005. – 976 с.
14. Проблемы комплексного анализа и оценки индивидуальной конструкционной надёжности космических аппаратов (на примере поворотных конструкций) / С.А. Тимашев, Ю.П. Похабов. – Екатеринбург: АМБ, 2018. – 38 с.

15. Похабов Ю.П. Проектирование высокоответственных систем с учётом надёжности на примере поворотной штанги // Журнал СФУ. Техника и технологии. – 2019. – Т. 12. – № 7. – С. 861–883.
16. Щербаков В.А., Приходько Е.А. Основы финансового функционально-стоимостного анализа. – Новосибирск: НГТУ, 2003. – 164 с.
17. Никольский В.В. Основы проектирования автоматических космических аппаратов. – СПб.: БГТУ, 2007. – 230 с.
18. Теория механизмов. Основные понятия. Терминология. Вып. 68. – М.: Наука, 1964. – 24 с.
19. Кузнецов А.А. Надёжность конструкции баллистических ракет. – М.: Машиностроение, 1978. – 256 с.
20. Кузнецов А.А., Золотов А.А., Комягин В.А. и др. Надёжность механических частей конструкции летательных аппаратов. – М.: Машиностроение, 1979. – 144 с.
21. Похабов Ю.П. О необходимости запасов движущих моментов (сил) в подвижных узлах раскрывающихся конструкций // Вестник машиностроения. – 2020. – № 2. – С. 29–33.
22. Золотов А.А., Похабов Ю.П., Гусев Е.В. Обеспечение проектной надёжности раскрывающихся конструкций космических аппаратов // Полёт. – 2018. – № 7. – С. 36–45.
23. Похабов Ю.П., Макаров В.П., Колобов А.Ю., Ковалёв А.В. Особенности обеспечения надёжности функционирования механических устройств раскрытия и фиксации конструкции посадочных модулей // Актуальные вопросы проектирования космических систем и комплексов. Сборник научных трудов. – Вып. 20. – 2019. – С. 151–166.
24. Баженов Ю.В. Основы теории надёжности машин. – М.: Форум, 2014. – 319 с.
25. Технологические методы обеспечения надёжности двигателей летательных аппаратов [Электронный ресурс] / Н.Д. Проничев, А.П. Шулепов. – Самара, 2011.
26. Проектирование и надёжность лазерных комплексов специального назначения / А.В. Белов, А.С. Борейшо, А.В. Морозов и др. – СПб.: БГТУ, 2014. – 347 с.
27. Проектирование технологий автоматизированного машиностроительного производства / И.М. Баранчукова, А.С. Гусев, Ю.Б. Крамаренко и др. – М.: Высш. шк., 1999. – 416 с.
28. Махутов Н.А. Конструкционная прочность, ресурс, и техногенная безопасность. – Новосибирск: Наука, 2005. – Ч. 1: Критерии прочности и ресурса. – 494 с.
29. Арасланов А.М. Расчёт элементов конструкций заданной надёжности при случайных воздействиях. – М.: Машиностроение, 1987. – 128 с.

30. Справочник по сопротивлению материалов / Г.С. Писаренко, А.П. Яковлев, В.В. Матвеев; отв. ред. Г.С. Писаренко. – Киев: Наук. думка, 1988. – 736 с.
31. Волков, Л.И. Надёжность летательных аппаратов / Л.И. Волков, А.М. Шишкевич. – М.: Высш. школа, 1975. – 296 с.
32. Шатров А.К., Назарова Л.П., Машуков А.В. Механические устройства космических аппаратов. Конструктивные решения и динамические характеристики. – Красноярск: СибГАУ, 2006. – 84 с.
33. Шатров А.К., Назарова Л.П., Машуков А.В. Основы конструирования механических устройств космических аппаратов. Конструктивные решения, динамические характеристики. – Красноярск: СибГАУ, 2009. – 144 с.
34. Романов А.В., Тестоедов Н.А. Основы проектирования информационно-управляющих и механических систем космических аппаратов. – СПб.: Профessional, 2015. – 240 с.
35. Корчагин Е.Н., Колобов А.Ю., Мурин А.В. Обеспечение надёжности // Многофункциональная космическая платформа «Навигатор» / под ред. С.А. Лемешевского. – Химки: Изд-во НПО Лавочкина, 2017. – С. 43-53.
36. Надёжность электрорадиоизделий: справочник. – М.: Изд-во 22 ЦНИИМО, 2006. – 641 с.
37. Доронин С.В., Похабов Ю.П. Повышение достоверности оценок прочности конструкций технических объектов // Вестник машиностроения. – 2013. – № 6. – С. 85–88.
38. Космические вехи: сб. науч. тр., посвященный 50-летию создания ОАО «ИСС» им. академика М.Ф. Решетнёва». – Красноярск: ИП Суховольская Ю.П., 2009. – 704 с.
39. Блехман И.И. Вибрационная механика – М.: Физматлит, 1994. – 400 с.
40. Литвинов Г.А. Вспомнить всё. Книга 5 [Электронный ресурс] / <https://новодевичье.рф/ocherki-vospominaniya/litvinov-g-vspomnit-vsyo/>
41. Пулято А.В., Коваленко А.В. Расчет размерных цепей. – Гомель: БелГУТ, 2008. – 32 с.
42. Гладкий В.Ф. Вероятностные методы проектирования конструкции летательных аппаратов. – М.: Наука, 1982. – 524 с.
43. Бирюков Г.П., Кукушкин Ю.Ф., Торпачёв А.В. Основы обеспечения надёжности и безопасности стартовых комплексов. – М.: Изд-во МАИ, 2002. – 264 с.
44. Алёшин В.Ф., Колобов А.Ю., Петров Ю.А. Проблемные вопросы прогнозирования и подтверждения надёжности космических аппаратов длительного функционирования // Наука и Образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. – 2015. – № 06. – С. 31–41.

45. Dhillon B.S., Singh C. Engineering reliability. – NJ.: John Wiley & Sons, 1981. – 339 p.
46. Модель и методика оценки влияния плановых мероприятий по предупреждению отказов конструкционного характера на надёжность космических аппаратов в части отказов их механических устройств одноразового срабатывания: СЧ НИР «Гарантия-2021» по государственному контракту № 1920730200892217000241851/851-0341/19/89 от 29.07.2019. – Железногорск: АО «НПО ПМ МКБ», 2019. – 220 с. – № ГР 1920730200892217000241851. – Инв. № 532-ОТ-МКБ-0031-19.
47. Похабов Ю.П. Что понимать под расчётом надёжности уникальных высокоответственных систем применительно к механизмам одноразового срабатывания космических аппаратов // Надёжность. – 2018. – Т. 18. – № 4. – С. 28–35.
48. Похабов Ю.П. Проектирование сложных изделий с малой вероятностью отказов в условиях Индустрии 4.0 // Онтология проектирования. – 2019. – Т. 9. – № 1 – С. 24–35.
49. Artyushenko A.G., Pokhabov Yu.P. Design and technology reliability analysis: fork // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 862(2). P. 022001(1–6). doi:10.1088/1757-899X/862/2/022001.

СПИСОК СТАНДАРТОВ

ГОСТ 24026–80	Исследовательские испытания. Планирование эксперимента. Термины и определения
ГОСТ 25123–82	Машины вычислительные и системы обработки данных. Техническое задание. Порядок построения, изложения и оформления
ГОСТ 26883–86	Внешние воздействующие факторы. Термины и определения
ГОСТ 2.102–2013	Единая система конструкторской документации. Виды и комплектность конструкторских документов
ГОСТ 2.103–2013	Единая система конструкторской документации. Стадии разработки
ГОСТ 27.002–2015	Надёжность в технике. Термины и определения
ГОСТ 27.310–95	Надёжность в технике. Анализ видов, последствий и критичности отказов. Основные положения
ГОСТ В 25613–83	
ГОСТ Р 15.016–2016	Системы разработки и постановки продукции на производство. Техническое задание. Требования к содержанию и оформлению
ГОСТ Р 51901.14–2005	Менеджмент риска. Метод структурной схемы надёжности
ГОСТ Р 53394–2009	Интегрированная логистическая поддержка. Основные термины и определения
ГОСТ Р 55996–2014	Системы космические. Требования к содержанию и построению разделов технического задания на разработку изделий космической техники научного и социально-экономического назначения
ГОСТ Р 56514–2015	Нормы прочности автоматических космических аппаратов
ГОСТ Р 56526–2015	Требования надёжности и безопасности космических систем, комплексов и автоматических космических аппаратов единичного (мелкосерийного) изготовления с длительным сроком активного существования
ГОСТ Р 58629–2020	Системы и комплексы космические. Анализ видов, последствий и критичности отказов изделий и процессов
ГОСТ Р ЕН 9100–2011	Системы менеджмента качества организаций авиационной, космической и оборонных отраслей промышленности. Требования

ГОСТ Р ИСО 9000–2015	Система менеджмента качества. Основные положения и словарь
ГОСТ РО 1410-001–2009 ОСТ 1 00448–2000	Авиационные стандарты. Надёжность изделий авиационной техники. Методы распределения показателей безотказности изделия между составными частями
ОСТ 92-0290–73 ОСТ 92-1542–83	Соединения резьбовые. Методы предохранения от самоотвинчивания
ОСТ 92-4339–80	Механизмы раскрытия и фиксации элементов конструкции. Общие технические требования. Методы контроля и испытаний
Р 50-54-82–88	Надёжность в технике. Выбор способов и методов резервирования
ОСТ 134-1005–96	Техническое задание на разработку космических комплексов научного и народнохозяйственного назначения и их составных частей. Структура и требования к содержанию и оформлению
AIAA S-114–2005	AIAA Standard. Moving Mechanical Assemblies for Space and Launch Vehicles (01 January 2005)
NASA-STD-5017A	NASA Standard. Design and Development Requirements for Mechanisms (31 July 2015)
ECSS-E-ST-33-01C	ECSS Standard. Space engineering, Mechanisms (06 March 2009)
ДСТУ 2860–94	Надійність техніки. Терміни та визначення