

Ю.П. Похабов

**ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА
ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЁЖНОСТИ
МЕХАНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ
ОДНОРАЗОВОГО СРАБАТЫВАНИЯ**

Монография

Электронное издание

Красноярск
2018

УДК 62-027.34+629.78
ББК 32.965.21-021+39.6
П648

Р е ц е н з е н т ы:

И.Д. Комаров, кандидат технических наук, начальник отдела научно-методического обеспечения качества, надёжности, безопасности космических комплексов и изделий ракетно-космической техники ФГУП ЦНИИмаш;

А.М. Лепихин, доктор технических наук, главный научный сотрудник Красноярского филиала Института вычислительных технологий СО РАН;

С.А. Тимашев, доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, научный руководитель НИЦ «Надёжность и ресурс больших систем и машин» УрО РАН

Похабов, Ю.П.

П648

Теория и практика обеспечения надёжности механических устройств однократного срабатывания [Электронный ресурс] : монография / Ю.П. Похабов. – Электрон. дан. (7,74 Мб). – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2018. – 1 электрон. опт. диск. (CD-Rom). – Систем. требования : PC не ниже класса Pentium I ; 128 Mb Ram ; Windows 98/XP/7 ; Adobe Reader v 8.0 и выше. – Загл. с экрана.
ISBN 978-5-7638-3900-5

Описаны теоретические основы и практические методы обеспечения надёжности изделий единичного и мелкосерийного изготовления с малой вероятностью отказов. На примерах механических устройств однократного срабатывания космических аппаратов показана возможность решения задач надёжности уникальных изделий без применения математического аппарата теории надёжности.

Представлен анализ конструкторских и технологических факторов, определяющих надёжность. Разработан инженерно-технический подход к обеспечению надёжности на различных стадиях жизненного цикла, основанный на придании разрабатываемому изделию свойств, способствующих безусловному выполнению служебного назначения. Дана методика конструкторско-технологического анализа надёжности. Предложены методы конструкторско-технологического обеспечения и оценки надёжности уникальных изделий. Рассмотрены принципы и правила проектирования для обеспечения требуемой надёжности.

Предназначена для практикующих инженеров, занимающихся разработкой механических устройств однократного срабатывания. Может быть полезна специалистам в области надёжности уникальных высокоответственных систем различного назначения.

УДК 62-027.34+629.78
ББК 32.965.21-021+39.6

Электронное научное издание

Похабов Юрий Павлович

Редактор *Т.М. Пыжик*

Корректор *З.В. Малькова*

Компьютерная верстка *О.А. Кравченко*

Подписано в свет 17.04.2018. Заказ № 4881
Тиражируется на машиночитаемых носителях

Библиотечно-издательский комплекс
Сибирского федерального университета
660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 82а
Тел. (391) 206-26-67; <http://bik.sfu-kras.ru>
E-mail: publishing_house@sfu-kras.ru

ISBN 978-5-7638-3900-5

© Похабов Ю.П., 2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

Список принятых сокращений	6
Предисловие	8
Глава 1. Терминология раскрывающихся конструкций.....	14
1.1. О важности терминологического аспекта	14
1.2. Синонимический ряд термина «раскрывающаяся конструкция».....	15
1.3. Терминология механических устройств одноразового срабатывания	27
1.4. Пример последствий применения нечёткой терминологии	32
Глава 2. Подходы к проведению анализов надёжности механических устройств одноразового срабатывания	38
2.1. Статистика отказов	38
2.2. Специфика требований к надёжности	48
2.3. Общие понятия о вероятности безотказной работы.....	51
2.4. Общие сведения из теории надёжности механических систем В.В. Болотина	55
2.5. Общие сведения из параметрической надёжности машин А.С. Проникина	57
2.6. Общие сведения о методике расчёта надёжности механических частей поворотных конструкций А.А. Кузнецова.....	59
2.7. Последующее развитие методики А.А. Кузнецова	64
2.7.1. Практика выбора значений запасов движущих моментов (сил)	66
2.7.2. Идеология проектирования, основанная на методике А.А. Кузнецова	69
2.7.3. Особенности обеспечения работоспособности поворотных конструкций при стохастическом и детерминированном подходах	73
2.7.4. Физический смысл запаса движущего момента (сил).....	80
2.8. Обобщённая параметрическая модель надёжности функционирования.....	86
Глава 3. Подход к разработке метода анализа надёжности с учётом конструкторских и технологических решений	102
3.1. Причины отказов механических устройств одноразового срабатывания	102
3.2. Краткий обзор концепций причин возникновения отказов.....	109
3.3. Пример совместного использования концепций причин возникновения отказов при конструировании.....	114

3.4. Специфика решения задачи надёжности раскрытия механических устройств одноразового срабатывания.....	118
3.5. Применение байесовских методов к конструированию безотказных изделий.....	119
3.6. Примеры технических решений по максимизации функции правдоподобия в условиях неопределённостей.....	125
3.6.1. Пример снижения вероятностей заклинивания поворотных конструкций при тепловых воздействиях.....	127
3.6.2. Пример снижения уровня монтажных деформаций.....	130
3.6.3. Пример повышения надёжности при страгивании.....	132
3.6.4. Примеры снижения моментов сил сопротивления в шарнире	135
3.6.5. Пример повышения достоверности расчётов на конструкционную прочность	136
3.7. Конструирование как процесс моделирования надёжных изделий...	138
Глава 4. Как следует понимать надёжность	143
4.1. Философические аспекты надёжности	143
4.2. Особенности количественного определения надёжности при параметрическом подходе	159
4.3. Надёжность как способность проявлять заданные свойства во времени.....	170
4.4. Обобщённые понятия надёжности.....	183
Глава 5. Конструкторско-технологические методы анализа и обеспечения надёжности	186
5.1. Взаимовлияние конструкторских и технологических факторов на надёжность.....	186
5.2. Предпосылки для разработки методов анализа надёжности с учётом конструкторских и технологических факторов	190
5.3. Конструкторско-технологический анализ надёжности	198
5.3.1. Функциональный анализ	204
5.3.2. Анализ худшего случая	212
5.3.3. Анализ (оценка) надёжности	213
5.4. Отличия конструкторско-технологического анализа надёжности от анализа видов, последствий и критичности отказов	221
5.5. Процедуры конструирования изделий с малой вероятностью отказов.....	224
Глава 6. Практика применения конструкторско-технологического анализа надёжности.....	227
6.1. Обзор примеров применения анализов надёжности с учётом конструкторских и технологических факторов	227

6.2. Пример конструкторского анализа надёжности устройства спускового.....	228
6.2.1. Описание конструкции устройства спускового.....	228
6.2.2. Функциональный анализ актуатора	233
6.2.3. Функциональный анализ держателя	235
6.2.4. Обобщенный функциональный анализ устройства спускового	236
6.2.5. Анализ худшего случая устройства спускового	236
6.2.6. Конструкторский анализ надёжности устройства спускового	237
6.2.7. Оценка безотказности устройства спускового.....	260
6.2.8. Выводы по результатам анализа надёжности устройства спускового	263
6.2.9. Рекомендации по доработке конструкции устройства спускового	265
6.3. Пример конструкторско-технологического анализа надёжности мембраны заглушки.....	266
6.4. Пример использования конструкторского анализа надёжности штанги рефлектора в рабочем положении.....	272
6.4.1. Конструкторский анализ надёжности штанги рефлектора в рабочем положении	275
6.4.2. Вариант оценки надёжности штанги рефлектора в рабочем положении	285
6.4.3. Выводы по результатам анализа надёжности штанги рефлектора в рабочем положении	290
6.4.4. Рекомендации по проведению дополнительных расчётов	291
Глава 7. Принципы и правила проектирования раскрывающихся конструкций	292
7.1. Подходы к разработке высоконадёжных изделий.....	292
7.2. Принципы и правила проектирования.....	299
7.3. Разработка принципов и правил проектирования с использованием методов конструкторско-технологического анализа.....	308
Заключение.....	312
Список литературы.....	315
Приложение	333

СПИСОК ПРИНЯТЫХ СОКРАЩЕНИЙ

АВПО	– анализ видов и последствий отказов;
АВПКО	– анализ видов, последствий и критичности отказов;
АН	– анализ (оценка) надёжности;
АХС	– анализ худшего случая;
БКУ	– бортовой комплекс управления;
БРУ	– быстроразъёмные устройства;
БС	– батарея солнечная;
ВБР	– вероятность безотказной работы;
ВВФ	– внешние воздействующие факторы;
ГО	– головной обтекатель
ДСЕ	– детали и сборочные единицы;
ЕСКД	– Единая система конструкторской документации;
ЕСТД	– Единая система технологической документации;
ЖЦ	– жизненный цикл;
КА	– космический аппарат;
КД	– конструкторская документация;
КЛТР	– коэффициент линейного теплового расширения;
КПД	– коэффициент полезного действия;
КТАН	– конструкторско-технологический анализ надёжности;
КТОН	– конструкторско-технологическое обеспечение надёжности;
КТК	– крупногабаритная трансформируемая конструкция;
КТМС	– крупногабаритная трансформируемая механическая система;
КЭ	– критичный элемент;
ЛА	– летательный аппарат;
МУ	– механические устройства;
МУ МС	– механические устройства многократного срабатывания;
МУ ОС	– механические устройства однократного срабатывания;
НДС	– напряжённо-деформированное состояние;
НИОКР	– научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы;
НТД	– нормативно-техническая документация;
НЭО	– наземная экспериментальная отработка;
ОКР	– опытно-конструкторская работа;
ОС	– однократное срабатывание;
ПКД	– проектная конструкторская документация;
ПСИ	– приёмо-сдаточные испытания;
РК	– раскрывающиеся конструкции;
РКД	– рабочая конструкторская документация;
РН	– ракета-носитель;

РСК	–	разделяемые средства крепления;
САС	–	срок активного существования;
СКМ	–	служебные конструкционные модули;
СО	–	система отделения;
СМК	–	система менеджмента качества;
СЧ	–	составная часть;
ТД	–	технологическая документация;
ТЗ	–	техническое задание;
ТЕО	–	точка единичного отказа;
ТК	–	трансформируемая конструкция;
ТСП	–	твёрдо-смазочное покрытие;
ТУ	–	технические условия;
УВБР	–	условная вероятность безотказной работы;
УВС	–	уникальные высокоответственные системы;
УС	–	устройство спусковое;
ФА	–	функциональный анализ;
ФКП	–	факторы космического пространства;
ФЭП	–	фотоэлектрические преобразователи;
ШУ	–	шарнирный узел;
CDR	–	Critical Design Review;
DFMEA	–	Design Failure Mode and Effects Analysis;
DFR	–	Design for Reliability;
FMEA	–	Failure Mode and Effects Analysis;
FMECA	–	Failure Mode, Effects and Criticality Analysis;
PDR	–	Preliminary Design Review;
PFMEA	–	Process Failure Mode and Effects Analysis.

*Всё просто. Если не просто – значит
чего-то не понимаешь
Ю.П. Похабов*

ПРЕДИСЛОВИЕ

Надёжность как система научных знаний и инженерная дисциплина обязана своим становлением бурному развитию в 50-е гг. XX в. систем вооружения и боевой техники с использованием электротехнических и электронных технологий [1]. Этому способствовала острая необходимость обеспечить боеготовность новейших средств вооружения и получить обоснованные ответы на вопросы, будет ли боевая техника работать тогда, когда это потребуется; сколько нужно иметь ракет на стартовых площадках, самолётов стратегической авиации или радиолокационных станций, если в случае ненадёжности часть из них окажется неэффективной; какие затраты по компенсации ненадёжности необходимо предусматривать для ремонтов и технического обслуживания, чтобы поддерживать надёжность техники на уровне 100 % и т. п. Не менее важной задачей было определение показателей эффективности систем вооружения, связанных с поражающей способностью и наносимым противнику ущербом. Необходимо было также снижать рост материальных и временных издержек при производстве военной техники, уменьшать риски возникновения катастроф и гибели людей при авариях, не допускать внезапных поломок техники во время боевых действий, снижать объёмы профилактических и ремонтных работ в полевых условиях. Также практические задачи требовали создания методик оценки и обеспечения надёжности для достижения приемлемой эффективности поражения противника и безотказности средств вооружения, при этом не было ни малейшей необходимости обеспечивать точность оценки *вероятности безотказной работы* (ВБР) выше 0,9. В условиях массовости производства боевой техники и больших потерь из-за частых отказов в основу теории надёжности были заложены методы теории вероятностей и математической статистики.

Со временем вероятностно-статистические подходы в надёжности получили широкое распространение во всех областях техники для оценки безотказной работы изделий на основе статистических данных. По мере возрастания требований к надёжности, для отдельных устройств и частей изделий стали устанавливать предельно высокую надёжность, поскольку в противном случае их создание теряло бы всякий смысл. Появилось понятие *высоконадёжные системы* и были разработаны асимптотические методы оценки надёжности, которые всё также основывались на вероятност-

но-статистических подходах [2]. Принадлежностью к высоконадёжным системам было условлено считать уровень ВБР не ниже 0,99 [3].

Развитие ядерных и космических индустрий привели к необходимости создания высоконадёжных систем, чья ВБР должна быть намного выше 0,999. В этом случае вероятностно-статистическая оценка надёжности становится уже бессмысленной из-за низкой достоверности результатов, а экспериментальное подтверждение теряет практический смысл по технико-экономическим соображениям [3]. Порознь или по совокупности такие высоконадёжные системы могут обладать определёнными признаками:

- 1) иметь заданную вероятность безотказной работы близкую к единице;
- 2) изготавливаться в одном экземпляре или малыми сериями и состоять из элементов единичного или мелкосерийного производства;
- 3) состоять из конструктивных элементов, которые являются *точками единичного отказа* (ТЕО), т. е. в их конструкции не может быть предусмотрено резервирования.

Для подобного рода технических систем до сих пор не выработаны ни должная классификация, ни общепринятая терминология, а для их называния пока предложены следующие понятия:

- *абсолютно надёжные системы* – для обозначения систем и объектов с ВБР не ниже 0,997 [3];
- *уникальные изделия*, которые не имеют каких-либо прототипов и опыта создания, но выполнение ими предельно ответственных функций предполагает максимально высокую надёжность [4];
- *уникальные высокоответственные системы* (УВС) для обозначения сложных технических систем и объектов единичного или мелкосерийного изготовления с малой вероятностью отказов [5].

С позиции парадигмы теории вероятностей о случайности событий понятие УВС выглядит предпочтительнее, чем понятие «абсолютно надёжная система», что следует хотя бы из известного высказывания Дугласа Адамса: «*Классическая ошибка, которую совершают проектировщики абсолютно надёжных систем, – недооценка изобретательности клинических идиотов*» [6]. Также УВС представляются убедительнее в сравнении с понятием «уникальные изделия» из-за дополнительной фокусировки внимания к повышенным требованиям по безотказности.

В качестве иллюстрации подходов к решению задач анализа и обеспечения надёжности УВС в данной монографии выбраны *механические устройства (МУ) одноразового срабатывания (ОС) раскрывающихся конструкций (РК) космических аппаратов (КА)*, но только лишь по той причине, что эта тема близка автору в силу профессиональных интересов. Родовым терминологическим понятием для данного класса технических

объектов является «одноразовое срабатывание», характерное для целого ряда устройств, к числу которых относятся:

- устройства гидроавтоматики технологического оборудования нефтяных скважин для цементирования затрубного пространства;
- устройства, срабатывающие мгновенно и однократно, например актуаторы, передающие воздействия с управляющего устройства на объект управления;
- самосрабатывающие огнетушители для автономного включения при определённом значении температуры или при воздействии открытого огня;
- термозапорные клапаны, предназначенные для автоматического прекращения подачи газа к газопотребляющим приборам при возникновении пожара с целью предупреждения взрывов;
- устройства для быстрого выравнивания давления в смежных замкнутых объёмах, разделённых газонепроницаемой перегородкой на экологически опасных производствах;
- складные аэродинамические поверхности *летательных аппаратов* (ЛА) (рули, закрылки, тормозные щитки, стабилизаторы и т. п.), которые в нерабочем состоянии примкнуты к корпусу аппарата, а в рабочем положении устанавливаются в другой плоскости под некоторым углом к нему.

Каждое из перечисленных устройств ОС создано с единственной целью – безотказно сработать в заданных условиях и режимах эксплуатации только один раз, в противном случае это всегда приводит к потерям, значительно превосходящим затраты на их разработку и изготовление. Очевидно, что применение методик расчётов надёжности, основанных на вероятностно-статистических подходах, которые заведомо допускают и предполагают отказы, для таких устройств неприемлемо.

Вероятностно-статистические подходы к оценке надёжности непригодны также для изделий, которые разрабатываются при отсутствии прототипов. По этой причине в первые годы развития космонавтики между разработчиками ракетно-космических систем и специалистами по надёжности сложились отношения, которые Б.Е. Бердичевский охарактеризовал одной фразой: «*Считают надёжность те, кто её не умеет делать*» [7]. И поныне ещё конструкторы всерьёз не воспринимают расчёты надёжности, расчётчики же не очень доверяют полученным «девяткам», а вместе они резонно полагают: какова там надёжность на самом деле – это пусть жизнь рассудит, на то она и определяется вероятностью. В итоге в ракетно-космической технике получили широкое распространение понятные каждому инженеру расчётно-экспериментальные методы исследования и подтверждения физических параметров изделий, которые прямого отношения к надёжности не имеют, но зато их результаты можно «пощупать руками»

с помощью математических формул при расчётах, на испытательном оборудовании при *наземной экспериментальной отработке* (НЭО) и при натуральных (лётных) испытаниях. Причём до сих пор непонятно, как результаты расчётно-экспериментальных работ при создании единичных образцов ракетно-космической техники соотносятся с заданной надёжностью.

МУ ОС, с одной стороны, как любые подобные устройства, не имеют права на отказ, поскольку только их безотказное срабатывание создаёт условия для нормального функционирования КА в течение *срока активного существования* (САС), с другой – как правило, не существует опыта их создания, поскольку они изготовлены без прототипов, максимум в нескольких экземплярах.

С первых шагов космонавтики МУ ОС являются неотъемлемой частью КА и имеют устойчивую тенденцию к усложнению конструкции механизмов раскрытия. Первый в мире простейший спутник ПС-1 был оснащён двумя антеннами, каждая из которых состояла из двух штырей (одна имела штыри длиной по 2,4 м, другая – по 3,9 м), и пружинными механизмами, разводящими штыри на угол 35° от продольной оси контейнера после сброса *головного обтекателя* (ГО) [8]. Современные космические аппараты уже не мыслятся без раскрывающихся элементов конструкций, а их линейные размеры в раскрытом положении всё чаще составляют десятки метров, например, 11 июня 2016 г. осуществлен запуск *ракеты-носителя* (РН) «Delta IV Heavy» с американским разведывательным спутником USA-268, имеющим на борту антенну, длина которой в полностью развёрнутом виде составляет порядка ста метров [9].

В условиях, когда невозможно применить традиционный математический аппарат теории надёжности, остаётся с помощью проектно-конструкторских решений придать устройствам ОС такие свойства, которые, безусловно, позволят им выполнить своё служебное назначение без отказов. При этом надёжность обеспечивается путём исключения недопустимых сочетаний параметров конструкции за счёт введения соответствующих конструктивных ограничений, методик изготовления и контроля. Такой подход позволяет дополнить хорошо зарекомендовавшие себя расчётно-экспериментальные методы конструкторскими и технологическими процедурами анализа надёжности, одинаково понятными как конструкторам, так и расчётчикам.

Книга написана для практикующих инженеров, занимающихся разработкой МУ ОС, поэтому автор не стеснялся «разжёвывать» прописные истины и старался при каждом удобном случае уделять внимание примерам из собственного практического опыта. Сделано это преднамеренно, ведь у каждого из читателей свой «уровень очевидности», а для достижения практических целей в надёжности важна любая, иногда даже самая

незначительная деталь. Принципиальной позицией автора является следование сложившейся в отечественной практике применения терминологии надёжности, а также методам анализов, расчётов и экспериментальной отработки, которые используют при создании ракетно-космической техники. По сути, всё, что содержит монография, является всего лишь дополнением или уточнением к тому бесценному опыту, без которого бы не состоялась отечественная космонавтика.

Книга состоит из предисловия, семи глав и заключения.

В главе 1 представлен обзор и проанализирована терминология РК, которая на седьмом десятке лет истории космонавтики так и не приведена к единым стандартам, что не способствует эффективному решению задач надёжности МУ ОС.

В главе 2 дан обзор подходов к проведению анализов надёжности механических устройств одноразового срабатывания. На основе общей теории надёжности механических систем В.В. Болотина [10; 11], параметрической надёжности, предложенной А.С. Прониковым [12; 13] и метода А.А. Кузнецова, по которому производится расчёт надёжности механических частей поворотных конструкций ЛА [14; 15], приведена обобщённая параметрическая модель надёжности функционирования МУ ОС.

В главе 3 описан подход к разработке метода анализа надёжности изделий с учётом конструкторских и технологических решений. Рассмотрено применение теории Байеса к конструированию, благодаря чему обоснован инженерно-технический подход к обеспечению надёжности, обусловленный приданием разрабатываемому изделию таких свойств, которые способствуют выполнению предписанного служебного назначения с малой вероятностью отказов.

В главе 4 определено смысловое значение надёжности, которое следует из парадигмы А.И. Уёмова [16] о триединстве вещей, их свойств и отношений. На основе выявленной взаимосвязи качества и надёжности сделан вывод о понимании надёжности одновременно и как свойства, и как способности. А далее с этих позиций рассмотрен *жизненный цикл* (ЖЦ) изделий для решения задач надёжности изделий с малой вероятностью отказов на каждой из стадий. Показано, что максимальный уровень ожидаемой надёжности соответствует окончанию стадии конструирования и на последующих стадиях (технологической подготовки производства, изготовления и эксплуатации) он способен только снижаться, из чего вытекает объективная необходимость разработки методов *конструкторско-технологического анализа* и *обеспечения надёжности* (далее – КТАН и КТОН соответственно) изделий с малой вероятностью отказов.

В главе 5 описаны основы реализации методов конструкторско-технологического анализа и обеспечения надёжности, а также приведены

процедуры КТАН с увязкой проведения вспомогательных методов *функционального анализа* (ФА) и *анализа худшего случая* (АХС). Предложен метод *анализа (оценки) надёжности* (АН) изделий с малой вероятностью отказов по результатам выполнения конструкторско-технологического анализа надёжности.

В главе 6 приведены примеры практического использования КТАН, которые были взяты из экспертиз реальных технических разработок МУ ОС [17–21].

В главе 7 определены принципы и правила проектирования МУ ОС на основе анализа литературных источников и личного опыта автора. Обоснована взаимосвязь принципов, правил и требований, обеспечивающих заданную надёжность.

В заключении сделан вывод о том, что наряду с прикладными методами теории надёжности (математическими, статистическими и физическими) конструкторско-технологические методы позволяют расширить возможности теории надёжности и сделать решение задач надёжности понятными и доступными для инженеров.

ГЛАВА 1

ТЕРМИНОЛОГИЯ РАСКРЫВАЮЩИХСЯ КОНСТРУКЦИЙ

1.1. О важности терминологического аспекта

Вряд ли возможно создание сложной высоконадёжной техники без проведения инженерных анализов, оценок и расчётов. Причём для получения достоверного результата наличие надлежащих алгоритмов и методик является необходимым, но не достаточным условием.

Слово «анализ» восходит к древнегреческому ἀνάλυσις в значении разложение, расчленение, и означает метод исследования объектов на основе разделения и изучения его отдельных *составных частей* (СЧ). Анализы надёжности проводят для определения того, способен или неспособен объект обладать заданной надёжностью.

Анализ – это прежде всего результат мыслительной деятельности, и здесь важно, как человек воспринимает и понимает объект исследования, каким методами и инструментами анализа пользуется, и опять же, как воспринимает и понимает сами эти методы и инструменты. При проведении любых анализов технических систем ключевую роль, безусловно, играют профессиональные знания, опыт и квалификация инженера, а также технические средства, инструменты и методики, которые используют для проведения исследований. Однако не менее важно, чтобы полученные результаты были должным образом донесены до сведения других людей (коллег, смежников, заказчиков и пр.) и поняты ими. Без использования развитой и точной терминологии анализы могут оказаться малоэффективными и даже недостоверными, а коммуникации между специалистами – затруднёнными. Некорректное использование и толкование терминов, некомпетентное оперирование понятиями, ошибки и неточности в терминологии способны серьёзно затруднить получение верного решения задач надёжности. В противном же случае можно существенным образом облегчить их решение.

Одним из направлений по эффективному использованию терминологии РК является совершенствование понятийного аппарата профессионального перевода [22], в то же время в научно-технической и справочной литературе ощущается дефицит работ по описанию терминов и соответствующих определений, классификаций, а также конструкций и устройств, условий и режимов их эксплуатации – всего того, от чего напрямую зависят выводы анализов по обеспечению их надёжности. В этой связи можно

отметить Государственный стандарт 1983 г. [23], который даёт исчерпывающие терминологические определения понятиям, относящимся к процессам соединения, разделения и отделения, служащим основой функционирования механизмов РК. Однако многообразие конструктивных решений МУ ОС, возникших после издания стандарта, а также изменения специфики и задач конструкций, породило множество относительно устойчивых понятий и терминов, которые не имеют общепринятых толкований и подчас являются сленговой лексикой инженеров внутри своих профессиональных групп. Поэтому волей-неволей приходится начинать с терминологии раскрывающихся конструкций.

1.2. Синонимический ряд термина «раскрывающаяся конструкция»

Для выполнения своего служебного назначения космические аппараты транспортируются на околоземную орбиту в составе космической головной части РН. Из-за ограничений, накладываемых габаритами зоны полезного груза ракеты-носителя, конструкции космического аппарата должны компактно складываться в заданном объёме и закрепляться в таком положении, чтобы обеспечить необходимую прочность и жёсткость при транспортировочных нагрузках. После доставки на околоземную орбиту закрепляемые конструкции должны быть автоматически освобождены от механических связей с аппаратом и раскрыты в рабочую конфигурацию по заданной команде извне. В раскрытом положении такие конструкции создают необходимые условия для штатной работы бортового оборудования и систем КА с заданными параметрами функционирования: панели *батарей солнечных* (БС) вырабатывают электрический ток, антенны и рефлекторы осуществляют приём и передачу радиосигналов, развёрнутые конструкции приборов и оборудования обеспечивают работу соответствующих бортовых систем и т. п.

Раскрытию складных конструкций всегда предшествует стадия отделения космического аппарата от последней ступени РН, которая осуществляется с помощью разъединяемого переходного устройства космического аппарата – *системы отделения* (СО). При её срабатывании производится программное снятие механических связей (разделение) КА с последней ступенью ракеты-носителя и разведение (отделение) их на безопасное расстояние для осуществления автономного полёта.

Отделившись, космический аппарат некоторое время всё так же, как и при полёте в составе РН, продолжает оставаться в сложенном (стартовом) положении до завершения подготовительной фазы, предшествующей процессу раскрытия складных конструкций. И лишь по программе, преду-

смотренной бортовой автоматикой, все складные конструкции КА должны занять своё рабочее положение: панели БС – развернуться, зонтичные антенны – раскрыться, параболические антенны – повернуться на заданный угол, приборы бортовой аппаратуры – выдвинуться на требуемое расстояние и т. п. После успешного завершения процесса раскрытия складных конструкций обеспечивается способность бортового оборудования и систем космического аппарата к функционированию.

Срабатывание СО и всех складных конструкций КА производится планомерно и последовательно, при этом суммарная надёжность $P_{КА}$ раскрытия равна

$$P_{КА} = P_{СО} \cdot \prod_{i=1}^n P_i, \quad (1.1)$$

где $P_{СО}$ – надёжность отделения космического аппарата от РН; P_i – надёжность раскрытия i -й складной конструкции; n – число складных конструкций.

Если событие, характеризующее отделение космического аппарата от ракеты-носителя, обозначить A , а событие, характеризующее раскрытие всех складных конструкций, – B , то надёжность раскрытия КА (1.1) можно представить как условную вероятность раскрытия складных конструкций при условии, что КА отделился от ракеты-носителя:

$$P_{КА} = P(B | A), \quad (1.2)$$

где $P(\cdot)$ – условная вероятность события, заключенного в скобках.

Надёжность отделения космического аппарата от РН и раскрытия складных конструкций имеет единую методологическую основу и принципы обеспечения, тем не менее, формула (1.2) даёт возможность сосредоточить внимание на вопросах надёжности складных конструкций, проблемам разработки которых посвящены монографии [14; 15; 24–27], учебные пособия [28–34], диссертации [35–38] и стандарты [23; 40–44]. Единственным и принципиальным отличием функционирования СО и складных конструкций является то, что после завершения процессов разделения и отделения, последние, не теряя связи с КА, раскрываются в рабочее положение и находятся в таком положении в течение всего САС.

Несмотря на многообразие конструктивных исполнений складных конструкций, обусловленных решаемыми задачами в заданных условиях **внешних воздействующих факторов (ВВФ)**, все они относятся к единому классу технических объектов. Основным признаком принадлежности к таким объектам служит одноразовое срабатывание в условиях космического пространства, характеризующее кратковременным процессом изменения своего пространственного положения в период подготовки КА к работе по служебному назначению.

В качестве примера складных конструкций на рис. 1.1 показан внешний вид КА «Экспресс-АМ6» на базе платформы «Экспресс-2000» в стартовом положении (*a*) с компактно уложенными и с раскрытыми параболическими антеннами и панелями БС в рабочем положении (*б*). Суммарная площадь поверхности панелей БС на «Экспрессе-АМ6» в раскрытом положении достигает 88 м^2 [45]. О степени трансформации КА семейства платформы «Экспресс-2000» можно судить по соотношению линейных размеров в стартовом и в рабочем положениях [46]:

- стартовое положение – описанный цилиндр диаметром 3800 мм и высотой 2168 мм;
- рабочее положение – размеры по трём ортогональным координатным осям $2825 \times 8840 \times 26800$ мм.

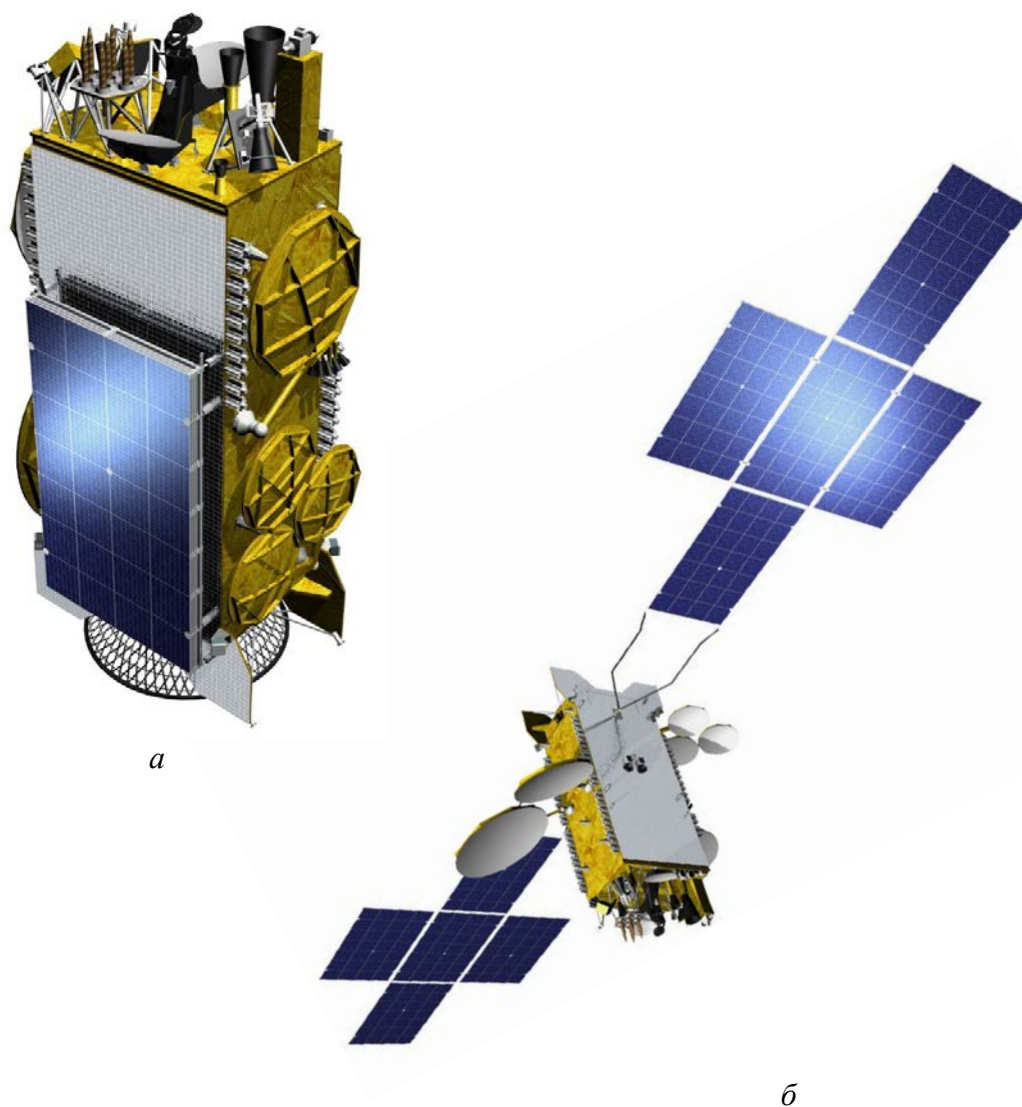


Рис. 1.1. Космический аппарат «Экспресс-АМ6»: *a* – стартовое положение; *б* – рабочее положение

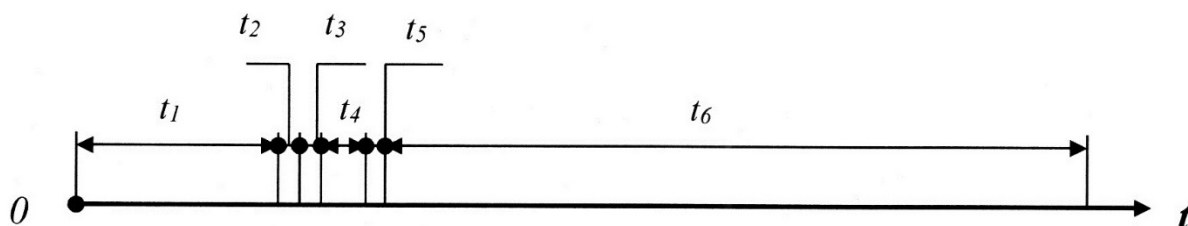


Рис. 1.2. Диаграмма состояний складных конструкций при функционировании

Функционирование складных конструкций КА (рис. 1.2) осуществляется путём последовательного изменения их состояний в течение ЖЦ.

Пребывание в том или ином состоянии складных конструкций в обобщённом виде характеризуется следующими временными интервалами:

t_1 – функционирование в компактной укладке конструкций в стартовом положении КА при хранении, наземной эксплуатации, транспортировании, полёте в составе РН и подготовке к раскрытию на околоземной орбите (суммарное время функционирования в стартовом положении может исчисляться несколькими годами);

t_2 – программная активизация инициатора срабатывания быстроразъёмных креплений, удерживающих конструкции в стартовом положении, в заданный момент времени по команде извне, фактически данный интервал времени измеряется мгновениями ($t_2 \ll t_1$);

t_3 – срабатывание быстроразъёмных креплений и освобождение закрепляемых конструкций от механических связей с опорным основанием (предписанное изменение кинематического состояния удерживающих устройств) ($t_3 \approx t_2$);

t_4 – выполнение заданных функций по изменению пространственной конфигурации складных конструкций, продолжающееся, как правило, от секунд до минут в течение нескольких часов после выведения КА на заданную орбиту ($t_2 \ll t_4 \ll t_1$);

t_5 – жёсткая фиксация конструкций в конце раскрытия (установка в рабочем положении) ($t_5 \approx t_3 \approx t_2$);

t_6 – выполнение служебного назначения конструкций в раскрытом положении в течение САС ($t_6 > t_1$), при этом раскрытые конструкции могут находиться как в стационарном положении, так и изменять своё угловое положение периодически или постоянно с целью повышения эффективности работы бортового оборудования.

Складные конструкции КА принято определять синонимическим рядом терминов, среди которых в научно-технической литературе и в профессиональном лексиконе наиболее часто употребляются упомянутые ранее термины «раскрывающиеся конструкции» и «механические устройства одноразового срабатывания», а также *трансформируемые конструкции*

(ТК), *крупногабаритные трансформируемые конструкции* (КТК) и *крупногабаритные трансформируемые механические системы* (КТМС). Термин КТМС вошёл в название отраслевого центра АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнёва» (АО «ИСС») [47]. Термины, определяющие складные конструкции КА, далеко не исчерпываются приведённой синонимией и зачастую не имеют общепринятых дефиниций.

При кажущейся незначительности различий слов «раскрытие» и «трансформация» разница с точки зрения надёжности представляется существенной.

Трансформация происходит от позднелатинского слова *transformatio* и означает превращение, преобразование и видоизменение чего-либо без нарушения целостности взаимосвязей трансформируемых элементов. Определение, данное Э.В. Медзмариашвили, толкует трансформируемую систему (конструкцию) как *«совокупность элементов, определённым образом связанных между собой, образующих целостность, характеризующуюся множеством фиксированных и промежуточных форм преобразования, при которых, сохраняя их целостность взаимосвязей, взаиморасположения элементов меняются в пространстве и во времени»* [24]. Такое определение ТК полностью характеризует состояние t_4 при функционировании складных конструкций (см. рис. 1.2) и в достаточной степени адекватно отражает состояния t_1 , t_2 и t_6 , если переходы из состояния в состояние укладываются в смыслы, понятия и определения этого термина в части неразрывности связей и целостности трансформируемых элементов.

Неувязки определения термина ТК с функционированием складных конструкций возникают для состояния t_3 в случае применения механических пружинных приводов, предназначенных для направленного высвобождения накопленной потенциальной энергии. С целью предотвращения несанкционированного срабатывания в такой складной конструкции должны быть предусмотрены удерживающие устройства, компенсирующие в сложенном положении направленное силовое воздействие пружин. Контролируемое раскрытие складных конструкций пружинными приводами может начаться только после снятия (разделения) удерживающих механических связей, что не соответствует понятию и определению термина «трансформация», поскольку в этом случае происходит нарушение целостности взаимосвязей трансформируемых элементов.

Состояние t_5 характеризуется мгновенным необратимым наложением механических связей в конце раскрытия, что приводит конструкцию в неизменяемое жёсткое состояние и также не соответствует понятию и определению термина «трансформация».

В то же время, если раскрытие в рабочее положение осуществляется электромеханическими приводами с функцией удержания конструкций в конечных положениях (торможения) без зачековки трансформируемых элементов, то функционирование в состояниях t_3 и t_5 вполне могут укладываться в понятия термина ТК.

Для определения механизмов срабатывания систем отделения термин «трансформируемая конструкция» совершенно непригоден, поскольку в данном случае основная задача – разрушение механических связей между космическим аппаратом и ракетой-носителем и разведение их на безопасное расстояние.

Слово «раскрытие», помимо значений, совпадающих с понятием «трансформация», включает в себя дополнительные смыслы – это наличие изначальных преград для раскрытия (состояние t_1), снятие механических связей для осуществления раскрытия (состояние t_3), наложение ограничений в конце раскрытия (состояние t_5) и осуществление доступа к чему-либо после завершения процесса раскрытия (изменение углового положения) (состояние t_6) [48].

Таким образом, термин «раскрывающаяся конструкция» не несёт каких-либо смысловых и понятийных ограничений, характерных для термина «трансформируемая конструкция», являясь при этом термином зонтичным, характеризующим и охватывающим конструктивно, структурно и функционально взаимосвязанную совокупность СЧ, обеспечивающих:

- складывание и удержание конструкций в стартовом положении;
- снятие удерживающих механических связей, трансформирование и фиксацию в рабочем положении;
- выполнение целевых задач по жизнеобеспечению бортового оборудования и систем КА в рабочем положении;
- перепозиционирование раскрытых конструкций в рабочем положении.

Такое представление о РК есть общее, не зависящее от характера целевых задач: приёма-передачи радиосигналов, выработки электроэнергии и энергоснабжения бортового оборудования, обеспечения терморегулирования приборов и оборудования и т. д., в том числе отделения частей КА, например отделения самого космического аппарата от последней ступени РН.

Зонтичный характер термина «раскрывающаяся конструкция» позволяет в полной мере характеризовать возможные стадии (табл. 1.1) их функционирования и кинематические состояния в течение ЖЦ.

Каждая из СЧ представляет собой совокупность *деталей и сборочных единиц* (ДСЕ), объединённых общим конструкторским замыслом и конструктивными решениями, соединённых на предприятии-изготовителе

или на месте монтажа сборочными операциями, специально разработанными и предназначенными для выполнения определённых функций в составе РК.

Таблица 1.1

Стадии функционирования и кинематические состояния раскрывающихся конструкций в течение ЖЦ

Стадии функционирования РК	Кинематические состояния РК
1. Эксплуатация в стартовом положении	Статичное состояние, соответствующее закреплению РК в стартовом положении
2. Раскрытие в рабочее положение	Динамичное состояние, соответствующее развёртыванию РК из стартового положения в рабочее
3. Эксплуатация в рабочем положении	Статичное состояние, соответствующее фиксации РК в рабочем положении
4. Перепозиционирование в рабочем положении	Динамичное состояние, соответствующее угловым перемещениям РК в рабочем положении

С позиции надёжности целесообразно различать следующие составные части раскрывающихся конструкций [38]:

1) Механизмы, устройства и конструктивные элементы, осуществляющие складывание и удержание РК в стартовом положении, а также снятие удерживающих (механических) связей, трансформирование и фиксацию в рабочем положении.

Для обозначения данной составной части существует практика применения в АО «ИСС» обобщающего термина «механические устройства одноразового срабатывания», отражённая в работах [28; 38].

Механические устройства одноразового срабатывания выполняют следующие функциональные задачи:

- защищают конструкции от разрушений и повреждений в стартовом положении, а также от воздействия вибраций и квазистатических перегрузок, возникающих при наземном транспортировании и во время полёта космического аппарата в составе РН;
- предотвращают соударения конструкции космического аппарата с ГО при вибрациях за счёт компактного складывания и закрепления конструкций в стартовом положении;
- осуществляют раскрытие конструкций в рабочее положение с целью подготовки бортового оборудования и систем КА к штатному функционированию;

- функционируют в рабочем положении в качестве силовой части конструкции, обеспечивая нормальную работу бортовых систем в течение САС за счёт неизменной геометрической формы, заданной точности позиционирования, требуемой жёсткости и прочности, выполнения ограничений со стороны системы управления КА по парциальным частотам собственных колебаний и т. п.

2) Приборы и оборудование, выполняющие функции жизнеобеспечения бортовых систем КА в рабочем положении.

Эта СЧ не имеет общепринятого обобщающего термина, но исходя из сущности и особенности её функционального назначения, по мнению автора, допустимо применить **условный термин служебные конструкционные модули (СКМ)** в виде функционально завершённых узлов для выполнения ими служебного назначения, включающих приборы и оборудование совместно с конструктивными элементами (кронштейнами, закладными деталями, крепежом, метизами и т. п.), которые конструктивно объединены в самостоятельный продукт.

Служебные конструкционные модули выполняют функциональные задачи по жизнеобеспечению КА на стадии эксплуатации в рабочем положении в течение САС. В зависимости от целевых задач РК они могут включать:

- **фотоэлектрические преобразователи (ФЭП)**, коммутационные электрические кабели, а также средства их монтажа и крепления, входящие в состав раскрывающихся панелей БС;

- приборы, оборудование и коммутационные электрические кабели поворотных штанг;

- антенно-фидерные устройства антенн и рефлекторов;

- радиоотражающие конструкции и поверхности складных зонтичных рефлекторов (например, радиоотражающее сетеполотно), включающие конструктивные элементы, которые формируют требуемый профиль радиоотражающей поверхности (например, ванты).

Служебные конструкционные модули относятся к так называемым «навесным конструкциям», которые размещают и закрепляют на механических устройствах, чья силовая структура служит опорным основанием и обеспечивает облегченные режимы работы СКМ на всех стадиях жизненного цикла. Выходные параметры служебных конструкционных модулей определяют требуемые конструктивные характеристики МУ ОС (размеры, конфигурацию, поперечные сечения конструктивных элементов, конструкционные материалы, массу, конструктивно-компоновочные и конструктивно-силовые схемы в стартовом положении и пр.), например, удельная электрическая мощность ФЭП на конец срока активного существования определяет требуемую суммарную площадь поверхности панелей солнечных батарей в рабочем положении.

Конструктивные характеристики служебных конструкционных модулей существенным образом влияют на надёжность МУ ОС, поскольку выступают для последних дополнительными факторами условий и режимов эксплуатации в виде:

- сложности механизмов удержания и раскрытия, напрямую зависящих от размеров раскрывающихся конструкций в рабочем положении и числа звеньев в конструкциях складывания/раскладывания;
- распределённых и сосредоточенных масс, обуславливающих уровень нагружения силовых конструкций при воздействии вибраций и квазистатических перегрузок в стартовом положении;
- реактивных моментов (сил) сопротивления в *шарнирных узлах* (ШУ) при раскрытии в результате деформации гибких коммутационных электрических кабелей и/или формообразующих вантовых конструкций, определяющих требуемую энергоёмкость приводов раскрытия;
- инерционно-массовых характеристик, которые влияют на время раскрытия, нагрузки при фиксации в рабочее положение и скорости перепозиционирования.

3) Устройства и механизмы, которые в случае необходимости могут использоваться для повышения эффективности параметров работы служебных конструкционных модулей в рабочем положении.

Эта составная часть также не имеет общепринятого обобщающего термина, но исходя из сущности и особенностей ее функционального назначения, по мнению автора, по аналогии с механическими устройствами одноразового срабатывания допустимо применить **условный термин механические устройства многократного срабатывания** (МУ МС).

Они выполняют функциональные задачи на стадии углового перепозиционирования РК в рабочем положении, предназначены для эпизодического или многократного срабатывания в течение САС, и в зависимости от целевых задач раскрывающихся конструкций включают:

- механические блоки системы ориентации БС для осуществления периодических разворотов при подстройке плоскостей размещения ФЭП под максимальные световые потоки солнечного излучения;
- механические блоки системы наведения антенн для осуществления перенацеливания и позиционирования углового положения антенн;
- механизмы точной подстройки положений крупногабаритных рефлекторов;
- электромеханические приводные устройства створок жалюзи системы терморегулирования для изменения их углового положения в зависимости от параметров теплового режима бортовой аппаратуры и пр.

При рассмотрении вопросов, связанных с терминологией РК, имеет смысл обратиться к истории появления терминов из синонимического ряда

на основе слова «крупногабаритный». Первоначально возникло понятие «крупногабаритная космическая конструкция», как следствие физических условий космического пространства – невесомости и вакуума, что открыло *«новые возможности для создания в космосе антенных систем большой протяжённости и антенных чаш больших размеров, плоских поверхностей для солнечных батарей больших площадей, крупногабаритных солнечных отражателей, телескопов большой апертуры радио- и оптических диапазонов, больших ёмкостей для хранения твёрдых, жидких и газообразных веществ, герметичных конструкций больших площадей и объёмов для работы и отдыха в них космонавтов»* [49].

Термин «крупногабаритная трансформируемая конструкция» прочно закрепился в синонимическом обороте одновременно с созданием в 2005 г. секции «Крупногабаритные трансформируемые конструкции космических аппаратов» в рамках проведения Решетнёвских чтений.



Решетнёвские чтения – ежегодная Международная научно-практическая конференция, проводимая Сибирским государственным аэрокосмическим университетом имени академика М.Ф. Решетнёва, АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнёва и АО «Красноярский машиностроительный завод». Конференция приурочена к 10 ноября – дню рождения советского конструктора-ракетчика Михаила Фёдоровича Решетнёва. Первая конференция состоялась 10 ноября 1997 г.

В научно-технической литературе не приводится чётких критериев, чем обусловлено появление слова «крупногабаритная» в термине «трансформируемая конструкция», и как определить разграничение по применению терминов «трансформируемая конструкция» и «крупногабаритная трансформируемая конструкция». В приказе Роскосмоса от 2006 г. *«О создании отраслевого центра крупногабаритных трансформируемых систем» на базе ФГУП «Научно-производственное объединение прикладной механики имени академика М.Ф. Решетнёва»* (ныне АО «ИСС») сказано, что образование центра связано с *«разработкой бортовых антенн с диаметром рефлектора 12, 24 и 48 метров и солнечных батарей площадью до 70 квадратных метров»* [50]. Справедливо полагать, что указанные в приказе Роскосмоса размеры конструкций несут смысловую нагрузку, позволяющую разделять термины, которые определяют ТК и КТК.

В 80-х гг. XX в. считалось, что необходимость развёртываемой конструкции антенн возникает, когда диаметр антенны превышает 2 м, а в случае использования многоразового транспортного космического корабля челночного типа – 4,2 м [51]. Современные РН позволяют выводить на орбиту складные антенны, диаметры которых в рабочем положении могут дости-

гать 129–130 м [52], что создаёт возможность транспортирования нераскрывающихся антенн существенно бóльших диаметров.

На рис. 1.3 показана условная граница размеров твердотельных нераскрывающихся и раскрывающихся антенн различных типов [27], которая определяется возможностью размещения конструкций под головными обтекателями современных ракет-носителей без складываний – это диаметр апертуры антенны 10 м. Разумеется, антенны с меньшим диаметром в зависимости от компоновки КА могут складываться, однако антенны с бóльшим диаметром не складываться уже не могут.

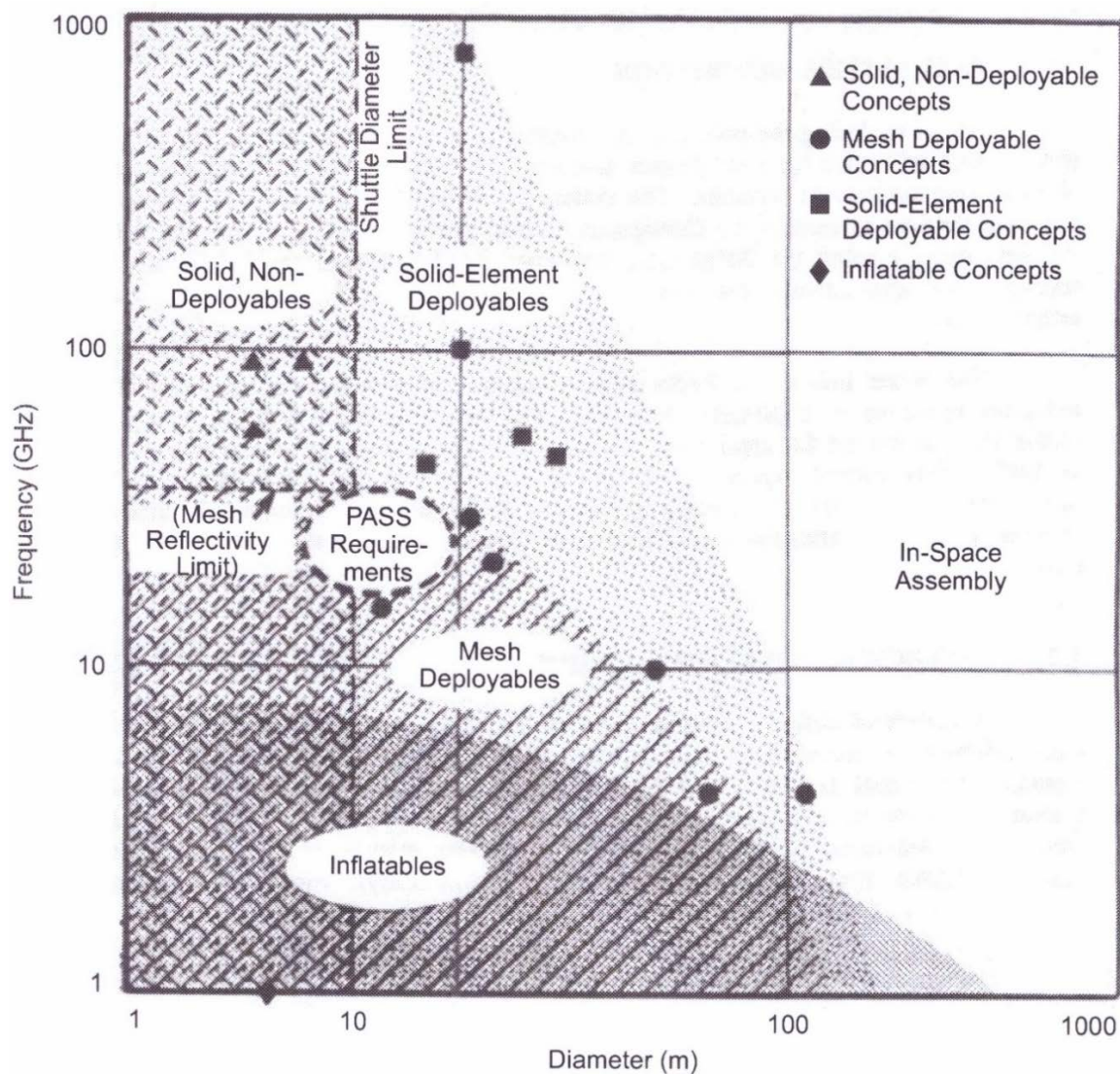


Рис. 1.3. Классификация типов антенн в зависимости от рабочих частот и диаметров

С определением границ размеров панелей солнечных батарей по критерию «крупногабаритная конструкция» найти объяснение сложнее,

поскольку на практике почти во всех случаях своего использования панели складываются. Поэтому не остаётся ничего другого, как принять в качестве условной границы, определяющей принадлежность конструкции к категории крупногабаритной, площадь панелей БС в рабочем положении более 70 м^2 .

Таким образом, под КТК при современном развитии средств выведения можно понимать антенны с диаметром апертуры в раскрытом положении более 10 м (соответствующая этому диаметру площадь круга – более $78,5 \text{ м}^2$) и панели БС в раскрытом положении площадью более 70 м^2 , площади которых в раскрытом положении имеют явно выраженную корреляционную схожесть. Указанная граница хоть и является в достаточной мере условной, но несёт в себе вполне конкретные смыслы и последствия, поскольку КТК – это во всех случаях конструкции, которые по сравнению с ТК, помимо увеличенных размеров, обладают повышенной конструктивной сложностью:

- содержат намного больше конструктивных элементов, находящихся в сложном структурном, функциональном, кинематическом, конструктивном и силовом отношении;
- характеризуются высокой степенью трансформации (отношение линейных размеров конструкции в рабочем положении к линейным размерам в стартовом положении);
- имеют моменты инерции в рабочем положении, соизмеримые или выше, чем у платформы КА, что усложняет управление движением аппарата на орбите;
- требуют учёта в рабочем положении дополнительных факторов и физических условий космического пространства: электромагнитного излучения Солнца, действия космических лучей, градиента гравитационного поля Земли и пр. [49; 53].

Исходя из сложившейся практики названия, все термины синонимического ряда, которые определяют складывающиеся конструкции КА, являются в известном смысле приемлемыми, но при условии, что их употребление не наносит ущерб смысловому восприятию и конечным целям применения терминов. Например, для повседневного рабочего общения допустимо использовать любой из терминов, лишь бы был понятен предмет обсуждения. Однако для проведения анализов и оценки надёжности, где, по выражению А.И. Берга, «нет неважных вещей» [54], предпочтительно употреблять термин «раскрывающаяся конструкция», передающий наиболее адекватное представление о принципах и алгоритмах функционирования складных конструкций космических аппаратов на каждой из стадий жизненного цикла с учётом назначения их составных частей.

1.3. Терминология механических устройств одноразового срабатывания

В отечественной *нормативно-технической документации* (НТД) терминология, аналогичная значению термина «механические устройства одноразового срабатывания», использовалась лишь однажды, как «механизмы раскрытия и фиксации элементов конструкции», «*обеспечивающие выведение в рабочее положение элементов конструкции, фиксацию их в этом положении и обратную укладку их, в случае необходимости, в исходное положение с помощью механических (пружинных) или электромеханических приводов*» [39]. В зарубежной практике МУ ОС принято именовать «подвижные механические узлы» («Moving mechanical assemblies», ММА) [43].

Термин «механические устройства одноразового срабатывания» без определения своего понятия был впервые применён в работе А.К. Шатрова (2006 г.) [28]. Использование этого термина отражает целевую направленность на выполнение задач механизмов по одноразовому раскрытию на орбитальном участке полёта космического аппарата в условиях *факторов космического пространства* (ФКП). По целому ряду причин указанный термин является наиболее удачным относительно ранее используемых терминов, таких как «система однократного применения» (1977 г.) [55], «объект одноразового использования» (1978 г.) [14] и «механизм одноразового действия» (2002 г.) [56]:

- словосочетание «механические устройства» указывает на совокупность механизмов, устройств и конструкций, которые конструктивно и функционально взаимосвязаны для преобразования сил при выполнении целевых задач;

- слово «одноразовый», в отличие от синонима «однократный», фокусирует внимание на том, что трансформирование механических устройств в течение ЖЦ может производиться неоднократно, но раскрытие в рабочее положение в натуральных условиях факторов космического пространства происходит только один раз;

- слово «срабатывание» указывает на возможность производить реверсные движения механизмов в ручном или автоматическом режиме при проверках функционирования в процессе проведения НЭО и при заводских испытаниях в пределах заданного (допустимого) числа циклов раскрытия/складывания [57].

Попытка определения термина «механические устройства одноразового срабатывания» была осуществлена в работе [38], он рассматривался как «*совокупность простейших механизмов (шарниров, рычагов, звеньев, фиксаторов и пр.), устройств (пироустройств, люфтовыбирателей, тол-*

кателей и пр.) и конструктивных элементов (стержней, рам, плоскостей и пр.), связанных между собой нестационарными геометрическими и кинематическими связями для выполнения заданных функций и обладающих:

- способностью осуществлять механические движения тел, изменяющие их положение в пространстве относительно других тел с течением времени по законам механики из сложеного положения в рабочее положение;
- автоматичностью и автономностью трансформирования;
- фиксацией и точностью позиционирования в рабочем положении».

Примеры конструктивного исполнения МУ ОС различных типов (поворотных, выдвигаемых, отделяемых) рассмотрены в работах [14; 15; 24–30; 33; 38]. Несмотря на многообразие конструкций механических устройств, в общем случае их структуру можно разбить на конечное число составных частей, каждая из которых может иметь многовариантность конструктивных решений, но подчиняется выполнению одной из функциональных задач в рамках обеспечения раскрытия. В качестве примера ниже представлена декомпозиция из десяти групп механизмов, устройств и конструктивных элементов механических устройств одноразового срабатывания поворотного типа.

1) **Быстроразъёмные устройства (БРУ)** используются в качестве инициаторов раскрытия складных конструкций. Их главным предназначением является мгновенный разрыв силовых связей (удерживающих конструкции в стартовом положении) на основе преобразования электрической энергии в механическую. Данная группа устройств, наряду с электромеханическими приводами, требует для начала функционирования получения команды извне от **бортового комплекса управления (БКУ)** или удалённых радиопередатчиков наземного комплекса управления, все остальные механические устройства срабатывают преимущественно автономно согласно заранее спланированному и организованному процессу последовательного раскрытия. По принципу срабатывания БРУ могут быть ударного действия на основе пиротехнических средств (пирочек, пироузлов, пироустройств) [33] и безударного действия, например на основе расплавляемых элементов [58].

2) **Разделяемые средства крепления (РСК)**, с одной стороны, служат для закрепления и удержания конструкций в стартовом положении, защиты их от разрушения при наземной эксплуатации и доставки на околоземную орбиту, а с другой – позволяют осуществить автоматическое освобождение конструкций от удерживающих механических связей для последующего развёртывания в рабочее положение. Разделяемые средства крепления используются совместно с БРУ, которые могут сочетаться между собой в различных комбинациях: они могут быть встроены в РСК или

разнесены друг от друга на значительные расстояния, но при этом всегда связаны управляющими конструктивными элементами (рычагами, тросами, нитями, механизмами). В различной терминологии разделяемые средства крепления называют пирозамками, замками, замками зачековки, держателями или устройствами фиксации, подразумевая при этом единую сущность выполняемых ими целевых задач: наложение и снятие механических связей согласно заданному алгоритму функционирования. По принципу удержания закрепляемых конструкций РСК можно условно разделить на устройства, реализующие концепции:

- «сквозного удержания» («thru hold» concept) за счёт силового прижатия конструкций к опорной поверхности [25; 30; 59];
- несилового удержания конструкций с зазорами в сопряжениях между удерживающими и удерживаемыми элементами [60; 61];
- «укладки в чемодан», когда удерживаемые устройства помещаются внутри жёсткой несущей конструкции, воспринимающей внешние нагрузки [62];
- создания предварительной деформации удерживаемой конструкции путём её изгиба в пролёте между опорными точками крепления, подобно натянутому луку [59];
- ограничения заданных перемещений закрепляемых узлов конструкции в фильерах, которые снимаются в результате отделения смежных частей КА [63; 64].

К РСК можно также отнести ограничители перемещений – упоры, частично уменьшающие кинематическую подвижность конструкций, например межпанельные упоры, которые устанавливаются в пакетах панелей солнечных батарей между противоположащими панелями для предотвращения их соударений при вибрациях с целью защиты целостности ФЭП [28; 59].

При описании процесса срабатывания РСК принципиально важное значение имеет понимание терминов «разделение» и «отделение» [23]. Под разделением понимается разрыв соединения между подвижными и неподвижными частями конструкций, а под отделением – процесс относительного удаления разделяемых частей. Терминологическое разделение указанных понятий подразумевает, что после срабатывания разделяемых средств крепления раскрытия конструкций может не произойти, если разделение осуществилось, а отделения не последовало из-за возникновения несанкционированных препятствий или сопротивлений в раскрывающихся узлах.

3) **Толкатели** используются после срабатывания РСК для срабатывания поворотных конструкций за счёт механической энергии пружин с целью преодоления трения покоя в кинематических парах, придания конструкциям начальной скорости движения и обеспечения выхода отделяемых

частей РСК из зоны сопряжения с неподвижными конструктивными элементами в начальной фазе движения [23]. Толкатели могут быть встроены в конструкцию замков [61] или выполненными в виде автономных устройств [15].

4) Собственно сами **поворотные части конструкции** (складные части БС, рефлекторов, антенн, штанг приборов и пр.), которые в стартовом положении закреплены на КА, в подвижном состоянии являются шарнирно сочленёнными твердотельными звеньями, а в рабочем положении образуют консоли с заданными геометрическими и жесткостными характеристиками.

5) **Шарнирные узлы** обеспечивают складывание конструкций в стартовое положение и относительные повороты частей конструкций при раскрытии. Они представляют собой одноподвижные вращательные кинематические пары, как правило, с применением подшипников [65].

6) **Приводные устройства** (приводы) обеспечивают аккумуляцию и высвобождение энергии для осуществления работы по раскрытию поворотных конструкций. В качестве приводных устройств используют электромеханические приводы, пружины кручения, пружины растяжения, часовые пружины и торсионы, например пучковые торсионы [66].

7) **Средства, упорядочивающие движения конструкций при раскрытии** в виде:

- тросовых петель, обеспечивающих пассивную синхронизацию угловых перемещений смежных частей поворотных конструкций [67];
- механизмов, обеспечивающих задержки раскрытия для проведения поочередного разворота звеньев поворотных конструкций [68];
- управляемых спусковых механизмов, осуществляющих регулирование скорости в ШУ с помощью периодической остановки и пуска регулируемого механизма раскрытия [69];
- комбинаций указанных выше средств.

8) **Гибкие коммутационные устройства**, пролегающие транзитом между поворотными частями конструкций, которые включают электрические и телеметрические кабели, средства металлизации и пр. Прокладка коммутационных устройств в ШУ осуществляется с таким расчётом, чтобы обеспечить минимально возможные моменты сил сопротивления при относительных поворотах конструкций и повторяемость результатов их измерений при наземных испытаниях [70].

9) **Фиксаторы конечного положения** поворотных конструкций (в другой терминологии – защёлки) [65] служат для обеспечения неподвижности поворотных частей конструкций в рабочем положении.

10) **Люфтовывбирающие устройства** в шарнирах, которые исключают неопределённость позиционирования частей конструкции в рабочем

положении в пределах возмущающих факторов, например при работе двигательных установок КА [65].

С учётом рассмотренной терминологии складных конструкций блок-схема построения РК показана на рис. 1.4.

Исходя из понятия и определения термина «трансформация» [24], ТК включают следующие составные части: поворотные части конструкции, ШУ, приводы, средства, упорядочивающие движения конструкций при раскрытии, и гибкие коммутационные устройства, которые входят в состав механических устройств наравне с БРУ, разделяемыми средствами крепления, толкателями, фиксаторами конечного положения и люфтовывбирающими устройствами.



Рис. 1.4. Блок-схема построения РК

Приведённая на рис. 1.4 блок-схема описывает универсальный порядок организации РК любого типа. Например, если подвижные механические узлы системы отделения КА рассматривать как раскрывающиеся конструкции, то их работоспособность при срабатывании, полностью обеспечивается следующими составными частями: быстроразъёмными устройствами, разделяемыми средствами крепления и пружинными толкателями, при этом в роли служебного конструкционного модуля выступает сам космический аппарат.

Организация взаимодействия между составными частями МУ ОС в процессе раскрытия должна предусматривать:

- полный контроль состояния механизмов и устройств в любой произвольный момент времени;
- резервные варианты срабатывания электротехнических и электро-механических устройств;
- автоматичность и автономность срабатывания МУ;
- полную определённость и предсказуемость положений, а также траекторий движения поворотных конструкций;
- недопустимость образования неподконтрольных обособленных частиц в процессе функционирования.

1.4. Пример последствий применения нечёткой терминологии

Механические устройства одноразового срабатывания представляют собой систему конструктивных элементов, каждый из которых, включая отношения элементов в системе, должен быть терминологически определён. Незрелость терминологии и дефиниций научных и инженерных понятий неизбежно заполняется использованием в разговорной лексике и в технических документах слов из сленгового оборота, что способно привести к недопониманиям и смысловым искажениям. Подтверждением тому служит применение термина «замок зачековки», относящегося к профессиональному сленгу инженеров-разработчиков МУ ОС для обозначения одного из типов разделяемых средств крепления. Как показывает практика обыденного применения словосочетания «замок зачековки», его чаще всего использует неосознанно и машинально, а в некоторых случаях это способно исказить понимание того, что под данным выражением имеется в виду, и может привести к небезобидным последствиям – вплоть до инженерных и конструкторских ошибок.

Терминологически понятие «замок зачековки», по мнению автора, можно определить как механическое запорное устройство, удерживаемое

в запорном состоянии чекой (в других терминологиях – фиксатором или стопором). Подразумевается, что в запорном (зачекованном) состоянии замок зачековки выполняет функцию удержания закрепляемого объекта, а в расचेкованном состоянии – функцию освобождения закрепляемого объекта для осуществления заданных перемещений. Соответственно под зачековкой понимается наложение механических связей при закреплении объекта путём установки чеки, а под расчековкой – разрыв механических связей с закрепляемым объектом путём удаления чеки. При этом чека представляет собой конструктивный элемент, снятие которого нарушает равновесное состояние закрепляемого объекта.

В процессе одного цикла функционирования замок зачековки находится в трёх состояниях:

- 1) зачекованном, в котором замок удерживает от перемещений под действием внешних нагрузок на опорном основании закрепляемый объект;
- 2) расчекованном подвижном, когда исполнительные элементы механизма замка осуществляют программное изменение геометрических положений для освобождения закрепляемого объекта (разделение и отделение [23]);
- 3) расчекованном неподвижном, в котором замок пребывает после освобождения закрепляемого объекта.

Нахождение замка зачековки в каком-либо из состояний или переход из одного состояния в другое согласно заданному алгоритму является процессом функционирования замка. В процессе одного цикла функционирования замок выполняет пять функций:

- 1) сохранение зачекованного состояния;
- 2) переход из зачекованного состояния в состояние «расчекованное подвижное» (разрыв механических связей в замке – разделение);
- 3) предписанное изменение конфигурации исполнительных элементов замка в состоянии «расчекованное подвижное» (относительное удаление отделяемой части замка – отделение);
- 4) переход из состояния «расчекованное подвижное» в состояние «расчекованное неподвижное»;
- 5) сохранение состояния «расчекованное неподвижное» в течение САС.

Надёжность выполнения функции 1 определяется свойством сохранения, которое заключается в сохранении значений показателей безотказности замка при срабатывании после эксплуатации в стартовом положении. Надёжность выполнения функций 2–4 определяется свойством безотказности, которое определяется непрерывностью сохранения работоспособного состояния замка в процессе функционирования. Выполнение функции 5 надёжностью не определяется, поскольку в состоянии «расчекованное неподвижное» замок уже выполнил своё служебное назначение –

освободил закрепляемый объект. В данном случае уместно говорить о сохранении конструктивной целостности замка в течение САС, чтобы не возникла возможность образования обособленных подвижных элементов, способных навредить работе КА, в том числе механических частей пиротехнических устройств после подрыва пиропатронов.

Для повторного и последующих срабатываний при проведении наземных работ реверсным движением поворотных элементов замок зачековки переводится из состояния «расчехованное неподвижное» в состояние «зачехованное». При определённом числе циклов наземных срабатываний следует рассматривать надёжность замка с позиций свойства сохраняемости, из-за рисков истирания и повреждения *твёрдо-смазочного покрытия* (ТСП) в парах трения при реверсных движениях, что влияет на свойство сохранять значения показателей безотказности замка зачековки по служебному назначению в натуральных условиях ФКП.

Верификация результатов анализа безотказности замка зачековки при выполнении функций 2–4 во многом зависит от того, насколько точно будет употреблён термин «замок зачековки».

В процессе функционирования в запорном состоянии замка зачековки чека удерживает в равновесии исполнительные элементы механизма замка (выполнение функции 1). После расчеховки (снятия чеки) (выполнение функции 2) освобождение удерживаемого объекта от механических связей в замке осуществляется путём преобразования энергии приводов и передачи её исполнительным элементам механизма замка с целью придания им направленной подвижности, обеспечения предписанного хода и запаса прочности (выполнение функций 3–4).

При выполнении функций 2 и 3 последовательно решаются три задачи:

- 1) инициирование снятия чеки (функция 2);
- 2) снятие чеки (функция 2);
- 3) относительное удаление отделяемой части замка от неподвижной (функция 3).

Конструктивно роль чеки выполняют силовые элементы, которые должны быть разрушены (т. е. в зависимости от конструктивного исполнения должны быть срезаны, расплавлены или пережжжены) по заданной команде. В качестве инициаторов снятия чек используют электрический сигнал, который подаётся от БКУ на нагреваемые или пережжгаемые элементы в зависимости от применяемых типов БРУ. Нагреваемые элементы (электрозапалы) применяют для подрыва пиропатронов, а пережжгаемые (расплавляемые) элементы – для быстрого безударного разъединения механических связей (частей). При срабатывании БРУ высвобождаемая энергия привода (энергия пороховых газов при подрыве пиропатронов или потенциальной энергии сжатых пружин в случае безударного разъединения) приводит к рас-

чековке (разрушению, перерезанию, кинематическому высвобождению и пр.) и приобретению подвижности исполнительных элементов замка.

В общем случае быстроразъёмные устройства могут быть разнесены на расстояния до нескольких метров от исполнительных элементов замков и соединены между собой механическими связями (тягами), что позволяет одним БРУ расчеховать до пяти замков (КА «Экспресс-АМ5», «Экспресс-АМ6», см. рис. 1.1).

После снятия чек исполнительные элементы БРУ и замка образуют геометрически изменяемую систему механизма замка, которая под направленным действием сил (моментов) приводных элементов (пружин) изменяет геометрическое положение элементов замка и освобождает закреплённый объект.

Таким образом, в общем случае своего исполнения конструктивная схема замка зачековки состоит из трёх частей, показанных на рис. 1.5:

- БРУ (пироузлов), для установки и мгновенного снятия чек, обеспечивающих выполнение функций 1 и 2;
- механических связей (тросовых тяг), которые предназначены для соединения исполнительных элементов БРУ и замка. Они создают условия для выполнения функций 1–4 (при выполнении функции 1 механические связи должны обеспечить стабильность зачековки, а при выполнении функций 2–4 не должны препятствовать срабатыванию замка);
- замков – механических запорных устройств, обеспечивающих выполнение функций 1–5 (при выполнении функции 1 конструктивные элементы замка должны обеспечить требуемую прочность и жёсткость, при выполнении функций 2–4 – требуемую работоспособность при срабатывании, а при выполнении функции 5 – конструктивную целостность замка в течение САС).

Структурно схема надёжности срабатывания замков зачековки представляет собой последовательное соединение трёх независимых в плане надёжности элементов: БРУ, механической связи и замка, составляющих единую функциональную группу. Элементы указанной функциональной группы характеризуются различными уровнями критичности отказов и методами резервирования *критичных элементов* (КЭ).

БРУ, как правило, подлежат резервированию, например, в пироузлах широко используются дублирующие пиропатроны с заданными нормируемыми показателями безотказности, подтвержденными статистикой срабатываний. Механические связи и замки относятся к устройствам, элементы которых представляют собой точки единичного отказа – места в системе, отказ компонента или обрыв связи в которых приводит к нарушению работы всей системы. Резервирование в местах ТЕО физически невозможно или ограничено по массово-габаритным показателям.

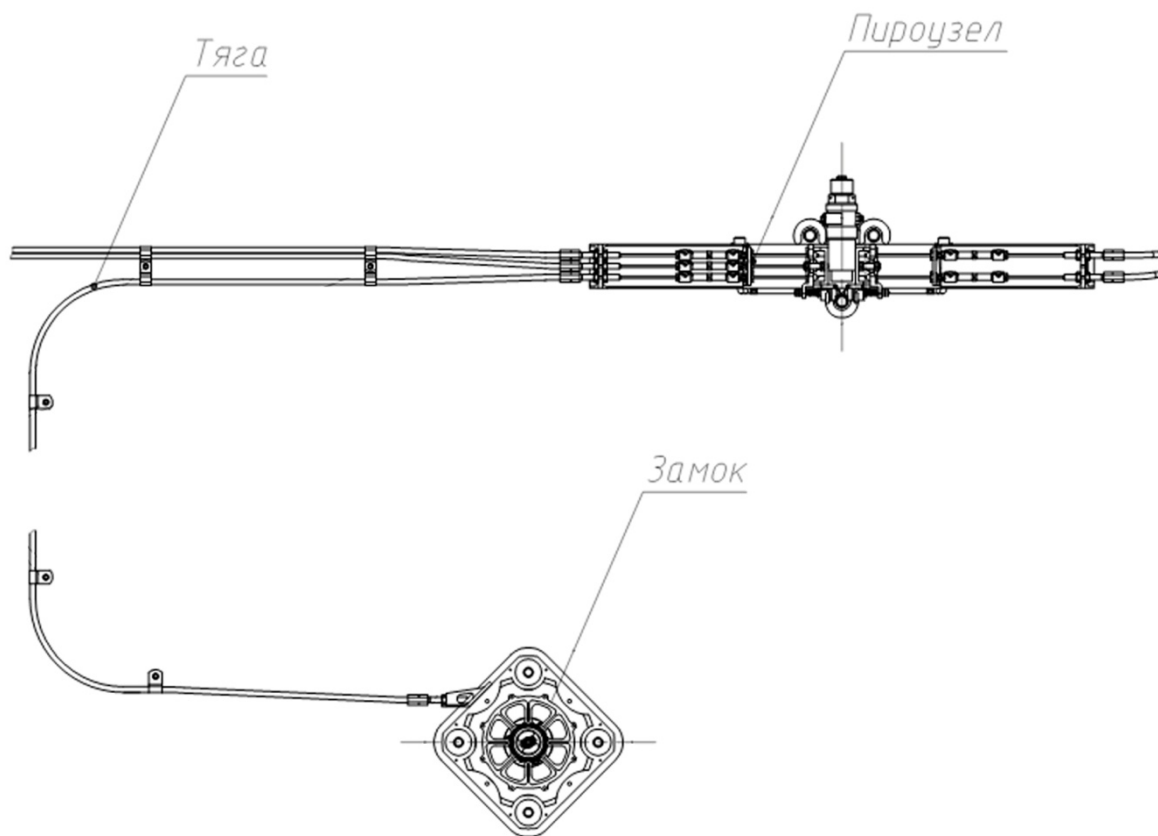


Рис. 1.5. Общий вид соединения замка и пироузла с помощью тросовых тяг

Конструктивное различие механических связей и замков заключается в том, что замки выполняют как единые компактные конструкции, обеспечивающие высокую повторяемость параметров при изготовлении, а механические связи при осуществлении их тросовыми тягами являются разнесёнными пространственно-протяженными конструкциями, в значительной степени формируемыми каждый раз по месту. Прокладка тросовых тяг по корпусу и конструкциям КА производится в гибких защитных оболочках (оболочках Боудена [71], или, в другой терминологии, боуденовских оболочках [72]) с перегибами в местах изменения направления трасс и организацией промежуточных точек креплений, что неизбежно повышает их отказоспособность. Причинами отказов могут служить как несанкционированные ослабления натяжения тросов (например, вследствие температурных деформаций или самопроизвольного изменения трасс пролегания тросов в оболочках Боудена под воздействием вибраций), так и возможность возникновения непредвиденных препятствий на пути протяжки тросовых тяг под действием пружин механизма замка после расчехловки (например, из-за попадания клея в подвижные части тросовых тяг при сборочных работах). Поэтому, несмотря на то, что использование тросовых тяг даёт возможность одним пироузлом расчехловать одновременно

несколько разноудаленных в трёхмерном пространстве замков, отстоящих друг от друга на расстоянии до нескольких метров (это безусловно повышает надёжность срабатывания замков), в целом требуется уделять пристальное внимание обеспечению безотказности функционирования самих тросовых тяг наряду с замками.

Последовательность соединения элементов функциональной группы «замок зачеховки» позволяет рассматривать надёжность каждого из её элементов изолированно друг от друга. Это даёт возможность и право обоснованно решать вопросы обеспечения надёжности составных элементов замка зачеховки, например замка как механического запорного устройства при условии, что надёжность остальных элементов (пироузлов и механических связей) по отдельности и в составе функциональной группы обеспечена.

Применяя на практике термин «замок зачеховки», часто подразумевают не всю совокупность составляющих его конструктивных элементов, а отдельно замок, оставляя за скобками механические связи и БРУ. Это особенно опасно, когда при распределении показателей безотказности между составными частями замка зачеховки отдельно задаются требования по безотказности для замка и для пироузла. Такая путаница понятий может привести к заблуждениям, которые чреваты ошибками при анализах надёжности (составлением неверной структурной схемы надёжности, выпадения из рассмотрения механических связей при проведении анализов, недооценкой специфики физических причин отказов отдельных элементов, неустановлением в чертёжной документации соответствующих требований по безотказности и т. д.).

Нечёткость дефиниций и вольность трактовок размывают границы понятий и способны увести в сторону от решения поставленных задач надёжности. В то же время систематизация и определение понятий исследуемых объектов, детализация и определённость условий их функционирования позволяют выбрать надлежащие и адекватные физические модели отказов, на основании которых производятся анализы и оценка надёжности.

Как показывают приведённые примеры и практика проведения анализов по обеспечению надёжности [17], скрупулёзный конструктивный анализ с применением добротного терминологического аппарата хотя и выглядит как формальная процедура, но на деле позволяет избежать многих ошибок при составлении исходных данных для проведения анализа надёжности и трактовки его результатов.

ГЛАВА 2

ПОДХОДЫ К ПРОВЕДЕНИЮ АНАЛИЗОВ НАДЁЖНОСТИ МЕХАНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ ОДНОРАЗОВОГО СРАБАТЫВАНИЯ

2.1. Статистика отказов

Как показывает история запусков КА, отказы механизмов раскрытия и фиксации элементов конструкции являются не столь уж редкими событиями:

- в обзоре, посвящённом анализу эксплуатации 449 европейских и американских геостационарных спутников за период с января 1995 по октябрь 2008 г., приводятся данные о том, что суммарная доля отказов механизмов и конструкций, в том числе систем развёртывания БС, составила 2,4 % от общего числа отказов КА, из них 1,8 % – это отказы со значительными последствиями [73];

- в статистических сведениях об осуществлении 236 миссий на орбитальных станциях «Салют-4, -6, -7», орбитальном комплексе «Мир» и МКС за период 1974–2012 гг. отмечено, что при выполнении 130 выходов в открытый космос порядка 4 % от общего числа операций при осуществлении внекорабельной деятельности были вызваны необходимостью воздействий на нераскрывшиеся конструкции [74];

- в статье [75] приведены сведения за 2000–2009 гг. об отказах при развёртывании КА непосредственно после вывода на орбиту, включая нераскрытия БС, невозможность стабилизации и неправильную ориентацию. Согласно этим сведениям доля таких отказов составляет 10,05 %, что соответствует средней вероятности отказов $Q_{cp} = 16,98 \cdot 10^{-3}$ 1/КА. Отказы СО были сгруппированы в отдельную группу отказов РН, которые включают отказы при отделении КА, в том числе их вывод на нерасчётную орбиту. На долю отказов систем отделения приходится 12,8 % от числа отказов ракет-носителей, которые в свою очередь составляют 38,5 % отказов аппаратов. Исходя из типов систем, оборудования или компонент, были также выделены восемь подмножеств отказов, среди которых механические неисправности и повреждения конструкций составляют около 15 %, уступая отказам радиоаппаратуры (26 %), программных средств (22 %) и систем электроснабжения (19 %).

На основании результатов приведённых анализов сложно воссоздать реальную картину отказов МУ ОС при раскрытии, поскольку исследователи ставили перед собой различные задачи и учитывали разные критерии проведения таких анализов. Ясно одно, что эти отказы не теряются в статистической погрешности отказов КА в целом.

В табл. 2.1 сведены случаи инцидентов на КА, связанные с нераскрытиями МУ ОС за период 1964–2017 гг., включая отказы СО.

Как видно из табл. 2.1, отказы МУ ОС заслуживают особого внимания из-за высокой тяжести последствий. В результате их возникновения спутники либо полностью гибнут до начала работы («Sinosat-2», «Можаец-5», «Канопус-СТ» и др.), или начинают работать с существенными ограничениями своих функциональных возможностей («Telstar 14», «Telstar 14R», «Intelsat-19» и др.), либо на преодоление аварийной ситуации требуется затратить дополнительные ресурсы КА, снижающие их срок активного существования, например, топливо для работы двигателей коррекции на спиновые манёвры при создании динамических воздействий на заклинившие механизмы («ANIK E2», «SES-4» и др.). Отказы остального бортового оборудования аппаратов чаще всего возникают постепенно либо внезапно в течение САС, когда уже происходит частичная амортизация затрат на его создание.

Данные об отказах в табл. 2.1 автор собирал по разрозненным открытым публикациям (отчёты страховых компаний, статьи, мемуары, новостные источники и пр.), поэтому их использование для статистических обобщений малопригодно вследствие неполноты и неоднородности данных: нет материалов о военных спутниках; практически отсутствует информация по азиатским спутникам, традиционно закрытая для всеобщего доступа; представлены отрывочные сведения об отказах в первые годы развития космонавтики, когда ещё не существовало практики страхования запусков (отчёты страховых компаний являются основным источником данных по отказам); сведены вместе отказы МУ ОС, которые имеют различное целевое назначение и конструктивное исполнение, разных разработчиков и изготовителей по всему миру. В табл. 2.1 также не отражены данные об отказах КА, приведших к их потерям непосредственно после запуска, если подлинные причины этих отказов так и не были установлены, например причины невыхода на связь в 2017 г. сразу двух КА «МКА-Н», в числе которых не исключались отказы, *«связанные с конструкцией аппаратов»* [76]. Однако даже имеющиеся сведения указывают на неснижающуюся мировую тенденцию к отказам МУ ОС.

Несмотря на свою неполноту, представленные в табл. 2.1 данные не мешают получить примерную частотную оценку безотказности развёртывания МУ ОС для сравнения с действующими нормативными показателями.

Таблица 2.1

Отказы подвижных механических узлов автоматических и пилотируемых КА за 1964–2017 гг.

КА	Производитель	Дата запуска	Отказы	Степень критичности отказов	Причины отказов	Примечание
Космос-41	ОКБ-1/СССР	22.08.1964	Обе дублирующие друг друга остро-направленные параболические антенны развернулись не полностью	Первоначально спутник назывался «Молния-1», но после нераскрытия антенн он не мог использоваться по назначению и получил новое наименование «Космос-41»	При анализе причин отказа было установлено, что после повреждения изоляции кабелей, идущих к штанге антенн при наземных испытаниях (без дополнительных испытаний), была произведена доработка кабелей путём обмотки поливинилхлоридной лентой, которая при низких температурах потеряла эластичность	
Союз-1	ЦКБЭМ/СССР	23.04.1967	Нераскрытие одного из двух крыльев БС	Досрочное прекращение программы полёта	Зацепление панели за маты экранно-вакуумной теплоизоляции	При посадке из-за отказа парашютной системы космонавт В.М. Комаров погиб
Союз-5	ЦКБЭМ/СССР	15.01.1969	Несрабатывание замков системы отделения приборного отсека от спускаемого аппарата	Вхождение в плотные слои атмосферы началось приборным отсеком вперёд. На высоте 80–90 км приборный отсек отделился, спуск происходил по баллистической траектории	Не сообщаются	Космонавт Б.В. Волынов при приземлении получил многочисленные тяжёлые травмы и ушибы
Skylab	McDonnell Douglas Corporation/США	14.05.1973	На участке выведения со станции сорвало теплоизолирующий экран, который вырвал одну панель БС и заклинил другую	Под угрозой была потеря станции из-за дефицита электроэнергии и нарушения терморегулирования	Причина заклинивания была вызвана попаданием обломка теплоизолирующего экрана в механизм раскрытия панели БС	Для устранения аварии потребовались два выхода астронавтов в открытый космос общей продолжительностью 4 ч 40 мин

Союз Т-8	НПО Энергия/СССР	20.04.1983	Нераскрытие штанги антенны системы сближения и стыковки «Игла»	Экипажу не удалось пристыковать корабль к станции «Салют-7», вследствие чего программа полёта была прекращена досрочно	Не сообщаются	–
Союз Т-9	НПО Энергия/СССР	27.06.1983	Нераскрытие одной из двух панелей БС	Экипажу удалось пристыковать корабль к станции «Салют-7»	Не сообщаются	–
TVSAT 1	Bundesministerium fuer Forschung und Tecnnologie/ Германия	21.11.1987	Нераскрытие солнечных батарей	Не известна	Не сообщаются	Страховая выплаты составили \$57 млн
Galileo	Jet Propulsion Laboratory, Ames Research Center, Hughes Aircraft Company/США	18.10.1989	Нераскрытие основной передающей антенны	Использование основной антенны оказалось невозможным, связь с Землёй осуществлялась с помощью двух маломощных антенн	В 2006 г. Европейское космическое агентство объявило, что нераскрытие антенны произошло из-за холодной сварки деталей антенны	–
Алмаз-1А	НПО Машиностроения/СССР	31.03.1991	Нераскрытие антенны левого борта	Потребовалось проведение переориентации станции для проведения съёмки полярных областей	Ошибка циклограммы раскрытия	–
АНИК Е2	Telesat Canada Ltd./Канада	04.04.1991	Нераскрытие антенны С-диапазона	После трёх месяцев проведения спиновых маневров на орбите антенна раскрылась	Не сообщаются	На проведение спиновых маневров было истрачено топливо, соответствующее одному году штатной работы аппарата на орбите. Страховые выплаты составили \$5 млн

Продолжение табл. 2.1

КА	Производитель	Дата запуска	Отказы	Степень критичности отказов	Причины отказов	Примечание
Direc TV-6	Space Systems Loral/США	08.03.1997	При выведении на орбиту была повреждена одна из панелей БС	Не сообщается	Не сообщаются	–
Batsat	Teledesic/США	26.02.1998	Нераскрытие одной из панелей БС	Полная гибель спутника	Не сообщаются	Страховые выплаты составили \$15 млн
EchoStar-4	Lockheed Martin/США	07.05.1998	Не раскрылись две из пяти панелей БС	Нераскрытие БС привело к наступлению страхового случая	Отказ привода	Страховые выплаты составили \$219 млн
Ямал-101	РКК Энергия/Россия	06.09.1999	Нераскрытие БС	Полная гибель спутника	По одной из версий, произошел обрыв силового электрического кабеля	Страховые выплаты составили \$50,5 млн
Mars Express	Европейское космическое агентство/ Великобритания	02.06.2003	Нераскрытие панелей БС и антенны на посадочном модуле «Beagle 2»	Посадочный модуль не вышел на связь	Факт нераскрытия БС и антенны на посадочном модуле «Beagle 2» был обнаружен через 10 лет с помощью камеры «Hirise», специально созданной для снимков поверхности Марса в высоком разрешении	
Telstar 14	Space Systems Loral/США	11.01.2004	Полностью не раскрылись южная и частично северная панели БС	Частичная гибель спутника. Отключены 17 из 41 транспондеров	Сообщается о заклинившей панели (the jammed panel) в результате дефекта, сделавшего спутник уязвимым к нагрузкам при запуске	Первый бразильский телекоммуникационный спутник «Estrela Do Sul.» Страховые выплаты составили \$205 млн

Можаец-5	Разработчик ВКА им. А.Ф. Можайского, изготовитель ПО «Полёт»/Россия	27.10.2005	Неотделение КА от третьей ступени РН	Полная гибель спутника	Не сообщаются	Ракетой Космос-3М было выведено 8 спутников, 7 из которых отделились успешно
Sinosat-2	Sino Satellite Communications Co. Ltd./Китай	29.10.2006	Нераскрытие панелей БС и телекоммуникационных антенн	Полная гибель спутника	Не сообщаются	–
Кику-8	Mitsubishi Electric Corporation	18.12.2006	Нераскрытие одной из двух лопастей антенн размером 17x19 м	Лопать антенны раскрылась самопроизвольно через несколько дней	Не сообщаются	Полномасштабная наземная отработка на раскрытие не проводилась
Eutelsat W2A	Thales Alenia Space/ЕС	03.04.2009	Не открылась антенна S-диапазона диаметром 12 м	Спутниковые операторы Astra & Eutelsat лишились возможности организовать мобильную связь в регионе, имеющем около 600 млн жителей	Не сообщаются	Спутник был объявлен частично утраченным. Получено страховое возмещение \$186 млн
SkyTerra-1 (MSV-1)	LightSquared, Boeing Space and Intelligence Systems (спутник) и Harris Corp (антенна)	14.11.2010	Неполное раскрытие антенны диаметром 22 м	14.12.2010 антенна раскрылась после реализации комплекса мер	Не сообщаются	–
Intelsat-28 (Intelsat New Dawn)	Orbital ATK/США	22.04.2011	Нераскрытие антенны С-диапазона	Частичная гибель спутника. Отключены 14 транспондеров	Не сообщаются	Страховые выплаты составили \$146 млн

КА	Производитель	Дата запуска	Отказы	Степень критичности отказов	Причины отказов	Примечание
Tels- tar 14R	Space Systems Loral/США	20.05.2011	Неполное раскры- тие одного из двух крыльев БС	Частичная гибель спут- ника. КА получает 60 % расчётного электропита- ния	Причиной аварии послужило заеда- ние механизма рас- крытия вследствие попадания в него жгута электропро- водки, сместивше- гося со своего мес- та из-за ослабления крепёжа	Второй бразильский те- лекоммуникационный спутник «Estrela Do Sul», Страховые выплаты со- ставили \$140 млн
Экспресс- АМ4	ГКНПЦ им. М.В. Хруничева/ Россия	19.08.2011	Спутник не отде- лился от разгонно- го блока «Бриз-М»	Полная гибель спутника	Не сообщаются	Убыток составил \$275 млн
Спектр-Р	НПО им. С.А. Лавочкина/ Россия	18.07.2011	Неполное раскры- тие радиотелеско- па	После полного прогрева основания радиотеле- скопа на Солнце в тече- ние суток были повтор- но включены приводы и радиотелескоп раскрыл- ся полностью (сработали все 27 телеметрических датчика концевых по- ложения лепестков)	Не сообщаются	–
SES-4	Space Systems Loral/США	14.02.2012	Неполное раскры- тие одного из двух крыльев БС	После раскочки спутни- ка двигателями коррек- ции на орбите панель раскрылась полностью	Не сообщаются	Голландский телеком- муникационный спут- ник

Intelsat-19	Space Systems Loral/США	01.06.2012	Нераскрытие и в последствие повреждение солнечной батареи	Частичная гибель спутника. КА получает 75 % расчётного электропитания	Причиной отказа объявлено редкое сочетание производственных факторов в ходе изготовления БС в компании-производителе КА, приведшее к структурным и электрическим повреждениям компонентов батареи (ослабло крепление небольшого нейлонового крюка, удерживающего графитовый кабель. В результате этот кабель начал произвольно раскачиваться и повредил часть БС). Страховые выплаты составили \$180 млн	
Прогресс М-19М	РКК Энергия/Россия	24.04.2013	Нераскрытие навигационной антенны дальнего сближения	Удалось провести стыковку с МКС с нераскрывшейся антенной в резервном автоматическом режиме	Попадание клея в механизм раскрытия антенны	Аналогичные дефекты обнаружены и устранены на ожидающих пуска КА «Союз ТМА-09М» и «Прогресс М-20М»
BRITE-CA 2 (BRITE-Montreal)	UTIAS (University of Toronto, Institute for Aerospace Studies)/Канада	19.06.2014	Неотделение спутника от РН	Полная гибель спутника	Не сообщаются	РН «Днепр» вывела на орбиту 32 спутника из 17 стран мира, один из них не отделился. Стоимость разработки \$1 млн
Союз ТМА-14М	РКК Энергия/Россия	26.09.2014	Нераскрытие одного из двух крыльев БС	Удалось провести стыковку с МКС с нераскрывшимся крылом БС	Попадание постороннего предмета в замок	После стыковки корабля с МКС крыло БС самостоятельно раскрылось
Прогресс М-27М	РКК Энергия/Россия	28.04.2015	Зафиксированы отказы ряда подсистем, в т.ч. двух нераскрывшихся навигационных антенн	Полная гибель спутника	Причина повреждений корабля, полученных в результате нештатного разделения 3-й ступени РН и транспортного грузового корабля (ТГК) – конструктивная особенность совместного использования ТГК и РН, связанная с частотно-динамическими характеристиками связки ТГК и 3-й ступени РН. Страховые возмещения составили ¥1,936 млрд	

Окончание табл. 2.1

КА	Производитель	Дата запуска	Отказы	Степень критичности отказов	Причины отказов	Примечание
Союз ТМА-17М	РКК Энергия/Россия	22.07.2015	Нераскрытие левого крыла панелей БС	Удалось провести стыковку с МКС с нераскрывшимся крылом БС	Не сообщаются	После стыковки корабля с МКС крыло БС самостоятельно раскрылось
Канопус-СТ (Космос-2511)	ПО «Полёт»/Россия	05.12.2015	Неотделение одного из двух военных спутников от разгонного блока «Волна»	Полная гибель спутника	Не сработал один из четырёх замков, осуществляющих закрепление спутника с разгонным блоком	–
Ресурс-П № 3	ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс»/Россия	13.03.2016	Нераскрытие одного из крыльев БС	Энергообеспечение КА производится на минимуме	Нарушение механической связи крепления пакета створки солнечной батареи, в результате чего произошло его преждевременное раскрытие и зацепление за конструкцию КА	
Маяк	Московский технологический институт/Россия	14.07.2017	Нераскрытие солнечного отражателя	Полная гибель спутника	Не сообщаются	Средства на спутник в сумме Р 5 млн собраны методом краудфандинга
Flock 2k	Planet Labs/США	14.07.2017	На одном из 48 выведенных аппаратов не раскрылись панели БС	Полная гибель спутника	Не сообщаются	–

В табл. 2.2 дана сводная информация по запускам КА и отказам РК за период 2009–2016 гг., причём сведения по космическим запускам приведены с сайта <http://ecoruspace.me/> [77], а информация по отказам МУ ОС взята из табл. 2.1.

Таблица 2.2

Сводная таблица по запускам КА и отказам РК за 2009–2016 гг.

Год	Число удачных запусков РН (КА)	Число отказов МУ ОС на 1 запуск
2009	75 (124)	1
2010	70 (121)	1
2011	79 (132)	4
2012	73 (136)	2
2013	78 (201)	1
2014	89 (231)	2
2015	83 (237)	3
2016	83 (216)	1
Итого:	630 (1398)	15

На основании данных табл. 2.2, средняя вероятность отказов при раскрытиях конструкций в 2009–2016 гг. составила не менее $Q_{\text{cp}} = 15/1398 = 10,72 \cdot 10^{-3}$ 1/КА, соответственно средняя безотказность раскрытий не превышает $P_{\text{cp}} = 0,9892$. Полученная таким образом безотказность раскрытий МУ ОС не будет достоверной частотной характеристикой отказов с позиций статистического толкования вероятностей, но свидетельствует о важном практическом выводе. Поскольку на каждом КА, по крайней мере, используется система отделения от РН (на малых аппаратах – от шасси РН), а количество отказов, представленное в табл. 2.1, является неполным, то полученная цифра определяет нижний уровень безотказности. Однако, если предположить, что на каждом КА могут использоваться до трёх типов механических устройств – это СО, раскрывающиеся панели БС и антенны, то с учётом (1.1) верхний уровень безотказности может быть не более

$$P_{\text{cp}}^B = \sqrt[3]{0,9892} = 0,9964.$$

Безусловная значимость проведённых оценок заключается в наглядном представлении того факта, что средний уровень безотказности МУ ОС находится намного ниже требуемых нормативных показателей вероятности безотказной работы. Как известно, требования к безотказности механизмов раскрытия и фиксации элементов конструкций в начале 80-х гг. XX в. задавались не ниже 0,999 при доверительной вероятности 0,9 [39], а для современных КА длительного функционирования, у которых САС должен быть не менее 7 лет [78], точечные значения ВБР различных типов

РК (отделяемых, выдвигаемых и поворотных) задаются на уровне 0,999 5–0,999 9 и выше [79; 80].

Приведённая статистика отказов объективно указывает на необходимость совершенствования подходов к проведению анализов и обеспечению надёжности МУ ОС при раскрытиях.

2.2. Специфика требований к надёжности

Обеспечение надёжности МУ ОС требует учёта ряда специфичных условий и особенностей работы, нехарактерных не только для обычной наземной техники, но и для бортовой аппаратуры КА:

- их служебное назначение заключается в автоматическом раскрытии конструкций из сложенного (стартового) положения в развёрнутое (рабочее), которое характеризуется одноразовым изменением пространственного положения тел, геометрических размеров, кинематических и механических связей, достижением требуемого позиционирования в рабочем положении с обеспечением заданных параметров прочности, точности, прецизионности, жёсткости, деформативности, устойчивости и пр.;

- функционирование по служебному назначению не предусматривает длительной наработки до отказа из-за кратковременности выполнения функций, в то же время для крупногабаритных РК превышение допустимого времени на раскрытие конструкций может квалифицироваться как отказ;

- из-за кратковременности выполнения функций по служебному назначению в подвижных узлах маловероятно развитие деградиционных процессов, связанных со старением, усталостью, охрупчиванием, сублимацией, износом и т. д., в связи с чем методы физики отказов для исследования надёжности здесь неприменимы;

- функционированию по служебному назначению РК предшествует длительная наземная эксплуатация в сложенном положении, перемежающаяся складыванием и раскладыванием конструкций во время проведения периодических проверок и испытаний, а также относительно короткие фазы полёта в составе РН и подготовки к раскрытию на орбите после отделения КА, в течение которых должна быть обеспечена сохраняемость показателей безотказности подвижных механических узлов;

- в связи с одноразовым и кратковременным функционированием по служебному назначению у механизмов РК отсутствует этап приработки, в процессе которого, как правило, выявляются конструкторские ошибки и производственные дефекты у обычных машин и механизмов;

- функционирование по служебному назначению производится однократно, но не однократно, т. е. в процессе осуществления ЖЦ на Земле пре-

дусматривается определённый ресурс циклов раскрытия/складывания за счёт возможности осуществления реверсных движений (чаще всего вручную), однако раскрытие в натуральных условиях производится только один раз в автоматическом режиме, без возможности повторного раскрытия. Тем не менее в составе любого МУ ОС присутствует устройство однократного действия – это БРУ, которое после каждого срабатывания на Земле подлежит замене;

- в элементах конструкции, как правило, не предусматривается структурного резервирования из-за принципиальной неосуществимости или ограничений по массово-габаритным показателям;

- верификацию требований безотказности в условиях единичного или мелкосерийного изготовления РК необходимо производить на уровне не ниже трёх девяток [39];

- осуществление реконфигурации в процессе эксплуатации (перехода из стартового положения в рабочее положение) требует рассматривать не только возможность наступления отказов из-за разрушений или возникновения недопустимых деформаций под действием нагрузок (надёжность по прочности), но и возможность наступления отказов по причинам нарушения работоспособности без признаков разрушений и необратимых деформаций (надёжность по функционированию), что помимо *«проклятия размерности»* [81], вызванного постановкой и решением задач с многими десятками тысяч (иногда и более) взаимозависимых увязанных параметров, имеющих изначально стохастическую природу, несёт в себе ещё и невозможность установления законов взаимосвязи параметров прочности и функционирования;

- ремонты (восстановления) после возникновения отказов, по крайней мере на автоматических КА, в большинстве случаев неосуществимы;

- несмотря на низкую частоту осуществления событий, характеризующихся малой вероятностью отказа, в каждом конкретном случае раскрытия ожидается и предполагается гарантированно успешный результат;

- из-за больших размеров и малой жёсткости в раскрытом положении полноценная отработка раскрытия конструкций на Земле из-за естественной гравитации практически невозможна;

- при проведении НЭО достоверная имитация комплекса воздействий на объект испытаний глубокого вакуума, невесомости, солнечной радиации и космического холода принципиально неосуществима в наземных условиях;

- для расчётов надёжности не существует математических моделей изделий, которые в течение ЖЦ последовательно функционируют в стартовом положении, при переводе из стартового положения в рабочее и в рабочем положении, когда существенным образом меняются конструктивные, структурные, функциональные, жесткостные, прочностные, кинематические и динамические параметры;

- наконец, рассчитать показатели надёжности сложной технической системы с точностью до трёх знаков и выше невозможно из-за низкой достоверности исходных данных, неадекватности типовых математических моделей надёжности с реальным функционированием изделий и высокой размерности уравнений, описывающих их функционирование [3].

Для выполнения своего служебного назначения по обеспечению автоматического раскрытия из сложенного положения в рабочее положение МУ ОС должны обладать строго определённой функциональностью в виде наличия и особенностей набора функций, позволяющих конструкциям:

- складываться в сложенное положение в заданных габаритных размерах;
- закрепляться в сложенном положении на КА с помощью разделяемых средств крепления;
- выдерживать в сложенном положении транспортировочные нагрузки и воздействия;
- снимать (разрывать) по команде извне механические связи с опорным основанием для осуществления раскрытия в рабочее положение;
- выполнять программные перемещения элементов конструкций из сложенного положения в рабочее;
- производить фиксацию конструкции при достижении рабочего положения;
- сохранять в рабочем положении в течение САС заданные параметры позиционирования, прецизионности, точности, устойчивости, жёсткости, прочности, деформативности и т. п.

Принято разделять функционирование МУ ОС при раскрытии в рабочее положение с учётом истории нагружения при транспортировании в сложенном положении и функционирование раскрытых конструкций в рабочем положении в течение САС. При этом способность РК к функционированию с заданными значениями параметров определяется работоспособностью, а степень сохранения во времени в установленных пределах значений этих параметров при функционировании в заданных условиях и режимах эксплуатации определяется надёжностью [82; 83]. Поскольку в процессе функционирования РК вмешательство человека не предусматривается, то какие бы то ни было нарушения функций при эксплуатации не допускаются, соответственно их надёжность характеризуется свойством безотказности – *«непрерывным сохранением работоспособного состояния в течение некоторого времени или наработки»* [82] или *«непрерывным сохранением способности выполнять требуемые функции в течение некоторого времени или наработки в заданных режимах и условиях применения»* [83]. Свойство безотказности объектов одноразового срабатывания количественно определяется показателем ВБР.

Если не подразумевается иного, то, по умолчанию, под надёжностью МУ ОС понимают безотказность функционирования при раскрытии. Значения ВБР при раскрытии всегда задают выше требований к безотказности бортового оборудования и систем КА (ретранслятора, бортового комплекса управления, систем электропитания, ориентации и стабилизации, коррекции и терморегулирования). Например, согласно нормативному бюджету надёжности КА на базе платформы «Экспресс-1000», показатели ВБР бортового оборудования и систем в конце САС должны находиться в пределах 0,91–0,992, а спутника в целом – 0,735, в то время как минимальное значение показателей безотказности при раскрытии МУ ОС должно быть не ниже 0,999 8 [79]. Высокие требования к безотказности механизмов раскрытия обусловлены ключевой ролью РК в процессе подготовки космического аппарата к функционированию по служебному назначению, когда в течение короткого времени все конструкции должны одноразово раскрыться, в то время как на безотказность бортового оборудования и систем КА оказывают влияние длительные процессы деградации материалов и конструкций.

Методики анализов (расчётов) надёжности МУ ОС РК на основе вероятностно-статистических подходов приведены в работах [14; 15; 28–30; 33], однако их точность не позволяет производить прогнозы ВБР свыше 0,997 [3].

В *технических заданиях* (ТЗ) на разработку РК для КА длительного функционирования в некоторых случаях задают требования по ВБР в рабочем (раскрытом) положении, связанные, например, с сохранением точности позиционирования крупногабаритных космических рефлекторов к концу САС. Причём уровень таких требований закладывается не ниже 0,995, что выше показателей ВБР для бортового оборудования и систем КА. Однако методики анализа (расчёта) надёжности раскрытых конструкций в рабочем положении к концу САС до настоящего времени ещё не разработаны. В зарубежной литературе существуют только общие подходы и рекомендации к *проектированию изделий с учётом надёжности* (DFR), которые сводятся к тому, что *«проектируемое изделие, обладающее наивысшим запасом прочности и одновременно удовлетворяющее всем ограничениям (по рабочей температуре, коррозионной устойчивости и эксплуатационному ресурсу материала, давлению, ползучести и т. п.), будет характеризоваться наивысшей надёжностью»* [84].

2.3. Общие понятия о вероятности безотказной работы

ВБР – это *«вероятность того, что в пределах заданной наработки отказ объекта не возникнет»* [82; 83]. В теории надёжности принято рас-

считывать ВБР, предполагая, что в начальный момент времени (начала исчисления наработки) объект находится в работоспособном состоянии [82]. Согласно указанному предположению, диаграмма, приведённая на рис. 1.2, даёт наглядное представление о наработке РК, в течение которой определяется безотказность:

- интервал времени t_1 определяет наработку для расчёта безотказности МУ ОС в сложенном положении;
- интервал времени $t_2 - t_5$ определяет наработку для расчёта безотказности МУ ОС при раскрытии с учётом обеспечения свойства сохранности в течение времени t_1 ;
- интервал времени t_6 определяет наработку для расчёта безотказности раскрытых конструкций в рабочем положении.

В общем случае ВБР $P(t)$ объекта в интервале от 0 до t включительно определяют следующим образом [82]:

$$P(t) = P\{\tau > t\}, \quad (2.1)$$

где $P\{\cdot\}$ – вероятность события, заключенного в скобках; t – время, понимаемое как параметр, служащий для описания последовательности событий и смены состояний объекта; τ – наработка от начального момента до возникновения первого отказа в виде непрерывной величины (продолжительность работы в часах, километраж пробега и т. п.) или целочисленной величины (число рабочих циклов, запусков и т. п.).

При решении уравнения (2.1) (используя методы теории надёжности или физики отказов) определяется вероятность недостижения отказов при наработке (заданной продолжительности или объёма работы изделия). В теории надёжности возникновение первого отказа рассматривается как случайное событие, а наработка до возникновения этого события – как случайная величина. В общем виде ВБР $P(t)$ является функцией наработки t , обычно эту функцию предполагают непрерывной и дифференцируемой.

Если способность объекта выполнять заданные функции характеризуется одним параметром v , то вместо (2.1) имеем формулу [82]:

$$P(t) = P\{v_*(t_1) < v(t_1) < v_{**}(t_1); t_1 \in [0, t]\}, \quad (2.2)$$

где v_* и v_{**} – предельные по условиям работоспособности значения параметров v , которые в общем виде могут изменяться во времени.

ВБР $P(t)$ связана с функцией распределения $F(t)$ и плотностью распределения $f(t)$ наработки до отказа [82]:

$$F(t) = 1 - P(t); \quad f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = -\frac{dP(t)}{dt}. \quad (2.3)$$

ВБР $P(t)$ может быть определена из эксперимента, результаты которого обрабатываются по формуле [14]:

$$P_N^*(t) = n(t) / N \approx P^*(t) \approx P(t), \quad (2.4)$$

где $n(t)$ – число неотказавших элементов к моменту времени t ; N – число элементов, поставленных на эксперимент; $P_N^*(t)$ – экспериментальная (ступенчатая) функция наработки; $P^*(t)$ – непрерывная функция наработки, полученная путём сглаживания ступенчатой функции $P_N^*(t)$ и являющаяся оценкой вероятности безотказной работы генеральной совокупности $P(t)$.

В общем случае, когда состояние объекта характеризуется не одним параметром, а набором параметров, ВБР может определяться с использованием методов общей теории надёжности механических систем В.В. Болотина [10; 11], параметрической надёжности А.С. Проникова [12; 13] или расчёта надёжности механических частей конструкции ЛА А.А. Кузнецова [14; 15].

При составлении параметрического описания работоспособного состояния любого объекта важнейшим понятием является «предельное состояние», которое в узком значении принято использовать для определения свойства долговечности [82; 83], но без искажения смыслов оно может применяться и для характеристики границ значений параметров, определяющих безотказность.

Рассмотрим некоторые из определений термина «предельное состояние», приведённые в НТД:

- «состояние объекта, при котором его дальнейшая эксплуатация недопустима или нецелесообразна, либо восстановление его работоспособного состояния невозможно или нецелесообразно» [82; 83];
- «состояние, при усугублении которого объект защиты не удовлетворяет установленным к нему требованиям» [85];
- «состояние, при котором дальнейшая эксплуатация объекта недопустима, связана с трудностями или нецелесообразна» [86].

Из приведённых определений видно, что предельное состояние – это такое состояние, в котором эксплуатация объекта в принципе возможна, но недопустима, нецелесообразна или связана с определёнными трудностями. Таким образом, предельное состояние – это пограничное состояние между допустимым и недопустимым (запредельным) состояниями объекта. Переход через предельное состояние в запредельное, т. е. через границу между указанными состояниями, соответствует какому-либо одному из видов отказов. Исходя из этого, отказ можно рассматривать, как «действие, заключающееся в переходе через одно из предельных состояний (реализация запредельного состояния)» [86], что позволяет трактовать понятие «предель-

ное состояние» в универсальном значении: как состояние объекта, при котором его дальнейшая эксплуатация должна быть прекращена в связи с достижением значений заданных параметров установленных пределов.

Предельное состояние системы по параметру v может быть выражено формулой

$$v_{\text{пред}}(t) = \begin{cases} v^{\text{мин}} \\ v^{\text{макс}} \end{cases}, \quad (2.5)$$

где $v_{\text{пред}}(t)$ – предельно допустимое значение параметра v , которое в течение времени может принимать минимально или максимально возможные значения.

Работоспособное состояние системы по параметру v в общем случае обеспечивается при следующем соотношении его предельно допустимых значений:

$$v^{\text{мин}} \leq v(t) \leq v^{\text{макс}}.$$

Например, если в качестве параметра работоспособности технической системы рассматривается радиальный зазор в подшипнике ходовой части машины $v = \delta(t)$, то его предельное состояние, с одной стороны, определяется минимальным зазором $v^{\text{мин}} = \delta^{\text{мин}}$, при котором подшипник может заклинить при нагревании или попадании в зазор абразивных частиц (предельное состояние по выполнению полезной работы, связанной с вращением подшипника), а, с другой – максимальным зазором $v^{\text{макс}} = \delta^{\text{макс}}$, например, из-за выработки, при которой подшипник может разрушиться вследствие биений при динамических нагрузках (предельное состояние по прочности), машина может потерять управляемость из-за недопустимых люфтов (предельное состояние по безопасности), вращающаяся деталь в подшипнике может начать цепляться за неподвижный корпус (предельное состояние по выполнению полезной работы, связанной с функционированием подвижного узла) и т. п. С учётом сказанного, подшипник в общем случае будет находиться в работоспособном состоянии в течение эксплуатации при выполнении неравенства

$$\delta^{\text{мин}} \leq \delta(t) \leq \delta^{\text{макс}}.$$

Формула (2.5) справедлива для любого из параметров технической системы, даже в том случае, если его предельные состояния (или одно из них) не связаны с надёжностью, например, когда предельное состояние определяется массой, при которой техническая система становится неэффективной из-за того, что *«на бесполезный вес конструкции тратится сила и на миллионные суммы расточается энергия. Тяжесть полезна разве только в паровом катке, и больше нигде»* [87]. Таким образом, если в ка-

честве параметра работоспособности технической системы рассматривать запас конструкционной прочности $\nu = n_3$ при детерминированных величинах нагрузки и прочности, то одно из предельных состояний будет ограничено выполнением условия прочности $n_3^{\text{мин}} = 1$, а другое – выполнением требований по ограничению массы конструкции $M^{\text{доп}}$, которая может быть опосредованно выражена через максимально допустимый запас прочности $n_3^{\text{макс}} = n_3(M^{\text{доп}})$. Например, при запасах прочности $n_3^{\text{макс}} \geq 3$ конструкция может оказаться слишком тяжёлой для выполнения своего служебного назначения, а её силовые элементы будут работать малоэффективно, поскольку находятся в недогруженном состоянии. Согласно определению термина «предельное состояние» эксплуатация объекта в этом случае может оказаться нецелесообразной, исходя из чего второе предельное состояние должно быть ограничено допустимым значением по массе конструкции, например $n_3^{\text{макс}} = 3$. Причём непревышение тройного запаса прочности элементов конструкции часто является на практике негласным критерием оценки эффективности анализов на конструкционную прочность в условиях дефицита массы. Таким образом, работоспособное состояние по прочности при ограничениях по массе определяют, например, нестрогим двойным неравенством

$$1 \leq n_3 \leq 3.$$

Если прочность рассматривать как параметр, влияющий только на надёжность, то работоспособное состояние по прочности допустимо определять неравенством

$$n_3 \geq 1.$$

С учётом (2.5) для вычисления ВБР $P(t)$ в общем виде вместо (2.2) можно использовать формулу с нестрогим неравенством

$$P(t) = P \{ \nu_*(t_1) \leq \nu(t_1) \leq \nu_{**}(t_1); t_1 \in [0, t] \}. \quad (2.6)$$

2.4. Общие сведения из теории надёжности механических систем В.В. Болотина

В 1969 г. В.В. Болотин опубликовал общую теорию надёжности механических систем в стохастической постановке с учётом факторов внешней среды, свойств, присущих системе, заданных технологических, эксплуатационных и прочих требований [10; 11]. Согласно этой теории подход к решению задач надёжности механических систем реализуется в соответствии с определённым алгоритмом действий.

1) Производится схематизация механической системы путём выбора пространства входных параметров $q \in Q$ и пространства выходных параметров $u \in U$, взаимосвязанных с помощью оператора L :

$$q = L \cdot u.$$

Пространство выходных параметров U выбирают таким образом, чтобы при помощи его элементов u можно было полностью охарактеризовать любое состояние системы. При изменении параметра времени t система переходит из одного состояния в другое. Эволюция состояний описывается функциями $u(t)$, а их геометрическим образом служат траектории в пространстве состояний U .

2) Определяется поведение системы при случайных воздействиях путём решения соответствующего стохастического уравнения зависимости внешнего воздействия $q(t)$ и функций выходных параметров $u(t)$.

3) Исходя из технико-экономических соображений с учётом технологических, эксплуатационных требований и возможностей вычислительных средств выбирают пространство качества V , в котором его элементы $v(t) \in V$ выражаются через элементы пространства выходных состояний $u(t)$ посредством операторного соотношения $v = M \cdot u$.

В области пространства качества V выбирают область допустимых состояний Ω , т. е. множество состояний системы, допустимых с точки зрения качества, причём граница области допустимых состояний соответствует предельным состояниям. Если $v \in \Omega$, то это означает, что параметры качества системы сохраняются в установленных допусках. В таком случае вероятность безотказной работы становится функционалом случайного процесса $v(t)$, который характеризуется изменением параметров системы во времени.

4) Функция надёжности $P(t)$ определяется как вероятность безотказной работы объекта на временном отрезке $[0, t]$, что соответствует вероятности пребывания элемента качества v в допустимой области состояний Ω :

$$P(t) = P \{v(t_1) \in \Omega; t_1 \in [0, t]\}, \quad (2.7)$$

где $P \{ \cdot \}$ – вероятность случайного события, описание которого дано в фигурных скобках.

Подход к оценке надёжности механических систем в общем виде (2.7) требует получения решений прямых многомерных нелинейных задач статистической динамики и ограничен гауссовыми моделями нагрузок и воздействий как случайных процессов во времени. Такой подход не позволяет получить оценку надёжности при сочетании (комбинации) нескольких нагрузок и воздействий в условиях реконфигурации конструкции в процессе эксплуатации, что является одной из главных специфик работы механизмов одноразового срабатывания.

Эксплуатация МУ ОС в сложенном положении осуществляется при наземной транспортировке и при полёте в составе РН, когда действуют внешние нагрузки: квазистатические перегрузки, синусоидальная и широкополосная случайная вибрации, одиночные удары и акустические шумы [80]. После сброса ГО на механические устройства в сложенном положении действуют нестационарные тепловые потоки солнечного излучения и космического холода в диапазонах от аномально положительных до аномально отрицательных значений температур, которые могут влиять на прочность как внешние нагружающие факторы в виде объёмного теплового расширения (сжатия), воздействия градиентов температур по сечениям конструктивных элементов, многократных циклов смены предельно низких и предельно высоких температур (термоциклирования). В качестве дополнительных нагружающих факторов, иногда выступают нагрузки от тяжёлых элементов предварительно напряжённых конструкций, монтажные деформации в опорных узлах, постоянно действующие усилия натяжения подложки панелей БС и радиоотражающего сетеполотна рефлекторов, действие приводных пружин и т. п. Многообразие нагрузок и комплексность их воздействия не позволяют получить обобщённый закон входных параметров $q \in Q$, которые имеют различную физическую природу:

- инерционную (такелажные и полётные перегрузки);
- динамическую (синусоидальная и широкополосная случайная вибрации, удары, акустические шумы);
- тепловую (температурное воздействие);
- статическую (предварительные и монтажные нагрузки в конструкциях).

2.5. Общие сведения из параметрической надёжности машин А.С. Проникова

На основе идеи В.В. Болотина об оценке вероятности нахождения вектора качества в допустимой области А.С. Проников разработал основы параметрической надёжности, связанной не с отказом функционирования изделия в целом, а с изменением его выходных параметров [12], что характерно для работы машин и станочного оборудования.

А.С. Проников [12; 13] отмечал, что состояние изделий характеризуется неким набором установленных параметров X_1, X_2, \dots, X_n , которые изменяются со временем и являются случайными функциями времени $X_i(t)$. Изменение параметров изделия в процессе функционирования может быть охарактеризовано траекторией общего вектора случайного процесса $X(t)$ в многомерном фазовом пространстве, в котором можно выделить две об-

ласти: область состояний E , в которой с заданной вероятностью находятся выходные параметры изделия в рассматриваемый период времени, т. е. область реализации случайного процесса $X(t)$, и область работоспособности G , которая ограничивает допустимые значения выходных параметров $X_1^{\max}, X_2^{\max}, \dots, X_n^{\max}$. Область состояний E изменяется с течением времени, а область работоспособного состояния G задана в соответствии с установленными требованиями к изделию согласно **техническим условиям** (ТУ). Если область состояний E находится внутри области работоспособности G , т. е.

$$E \subset G, \quad (2.8)$$

то изделие функционирует нормально.

Выход области реализации случайного процесса $X(t)$ за границы области работоспособности G означает возрастание вероятности перехода изделия в такое состояние, когда его отдельные параметры примут недопустимые значения, т. е. произойдёт **параметрический отказ** [88], при котором функционирование изделия сохраняется, но происходит выход значений одного или нескольких его параметров за пределы, установленные в НТД и (или) **конструкторской и технологической документации** (далее – КД и ТД соответственно).

Методологические основы решения задач параметрической надёжности А.С. Проников пояснил на примере изменения выходных состояний параметров машины, показанных на рис. 2.1, где условно представлено двумерное фазовое пространство, в котором обозначены границы области состояний E в начальный момент времени работы машины E_0 и на конец наработки E_k . При этом $E(t)$ есть функция времени в зависимости от длительности эксплуатации.

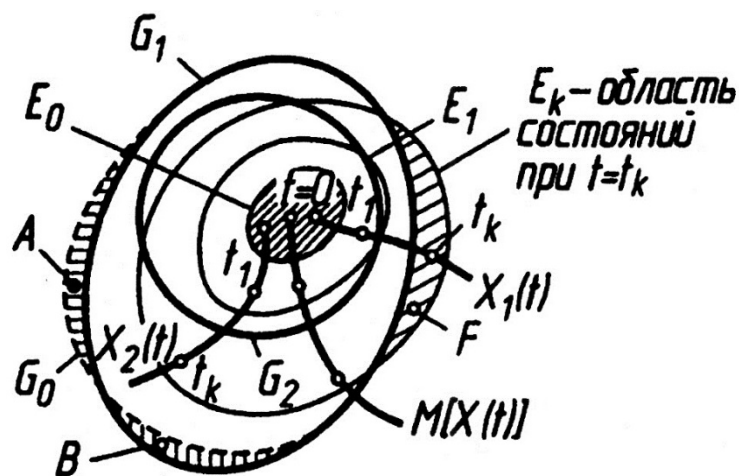


Рис. 2.1. Области состояний и работоспособности для выходных параметров машин

На рис. 2.1 также приведены показатели реализации процесса изменения параметров $X_1(t)$ и $X_2(t)$, математическое ожидание этого процесса $M[X(t)]$ и границы трёх областей работоспособности G_1 (назначенную) и G_2 (жёсткую) для разных требований к точности функционирования изделия, а также G_0 (требуемую работоспособность изделия).

Предположим, что к концу наработки $t = t_k$ область состояний E_k приняла такие размеры, что её часть F вышла за пределы области G_1 и, следовательно, возникла вероятность нарушения условия нахождения всех параметров в допустимых пределах. В частности, к нарушению работоспособности изделия привело его функционирование, описываемое реализацией выходного параметра $X_1(t)$, причём отказа функционирования по реализации процесса в целом $X(t)$ не произошло (траектория процесса $M[X(t)]$ находится в области G_1). В случае более строгих условий работоспособности G_2 выход параметров за установленные пределы наступит раньше.

Разница между G_0 и G_1 заключается в том, что область A является областью неиспользованных возможностей изделия, которое по ТУ считается потерявшим свою работоспособность, а область B будет областью неучтённых возможностей, когда согласно ТУ изделие ещё можно эксплуатировать, но в действительности оно уже стало неработоспособным.

Причины изменения состояний изделия в парадигме параметрической надёжности определяются кинетикой накопления повреждений под воздействием различных видов энергии, характерных для машин с длительным временем эксплуатации. При использовании изделий ОС методы физики отказов играют второстепенную роль из-за незначительной наработки, в течение которой повреждения не способны проявиться, т. е. область состояний изделий E слабо зависит, а в некоторых случаях может и вовсе не зависеть от времени. Таким образом, для МУ ОС сама идея, основанная на допустимости возникновения параметрических отказов, принципиально неприемлема, поскольку любой параметрический отказ способен привести к его отказу в целом из-за выхода одного из параметров X_1, X_2, \dots, X_n за границы области работоспособных состояний G .

2.6. Общие сведения о методике расчёта надёжности механических частей поворотных конструкций

А.А. Кузнецова

В отличие от общей теории надёжности механических систем В.В. Болотина и параметрической надёжности машин А.С. Проникова, методика расчёта надёжности А.А. Кузнецова изначально разработана с учё-

том специфики работы механических частей поворотных конструкций ЛА в сложенном положении и при раскрытии в рабочее положение [14; 15].

При расчётах надёжности изделий, которые одновременно могут находиться в нескольких предельных состояниях, А.А. Кузнецов предложил использовать **метод фиктивных элементов** [14], позволяющий учитывать способы соединения элементов, которые находятся в разных предельных состояниях, виды отказов и зависимость по надёжности между элементами.

Фиктивным элементом называется реальный элемент, который рассматривается лишь в одном из предельных состояний и соответственно имеет лишь один вид отказов. Если тот же элемент может иметь и другой вид отказов, то вводится другой фиктивный элемент, находящийся в другом предельном состоянии. Число фиктивных элементов соответствует предельным состояниям, в которых может находиться реальный элемент.

Все фиктивные элементы в системе соединены последовательно, так как отказ любого фиктивного элемента приводит к отказу реального элемента. Прикладывая к системе из фиктивных элементов реальные внешние силы, можно выявить зависимость по надёжности между фиктивными элементами [15]:

$$P = \phi (P_1, P_2, \dots P_m), \quad (2.9)$$

где ϕ – функция надёжности между фиктивными элементами; m – число фиктивных элементов; $P_1, P_2, \dots P_m$ – надёжность фиктивных элементов.

Если фиктивные элементы в системе независимы в смысле надёжности, то вместо (2.9) имеем

$$P = \prod_{i=1}^m P_i. \quad (2.10)$$

Согласно методике А.А. Кузнецова безотказность механических частей поворотных конструкций определяется недостижением одного из двух возможных предельных состояний:

- по прочности, когда несущая способность конструкций превышает действующие нагрузки;
- по функционированию, связанному с невыбросом случайных параметров за установленные пределы в процессе поворота механических частей конструкций.

Соответственно надёжность механических частей поворотной конструкции можно представить с помощью модели, состоящей из двух фиктивных частей, соединённых последовательно, одна из которых находится в предельном состоянии по прочности, а другая – по функционированию, с учётом чего формулу (2.10) можно записать в виде

$$P = P_{\pi} \cdot P_{\phi}, \quad (2.11)$$

где $P_{\text{п}}$ – надёжность по прочности; $P_{\text{ф}}$ – надёжность по функционированию при раскрытии.

Основные положения метода анализа надёжности, предложенного А.А. Кузнецовым, можно показать на примере однозвенной поворотной штанги магнитометра КА «Глонасс», показанной на рис. 2.2.

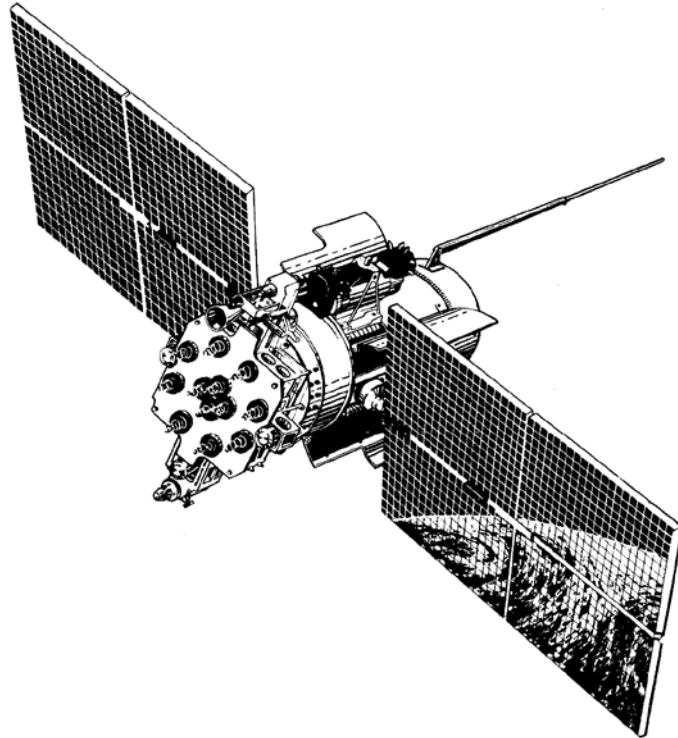


Рис. 2.2. КА «Глонасс» с раскрытыми панелями БС и штангой магнитометра

Конструктивная схема штанги без магнитометра приведена на рис. 2.3. Следует отметить, что в общем случае на свободном конце штанги могут размещаться приборы и оборудование различного назначения, например антенны, панели БС, устройства ориентации и т. п., необходимые для работы бортовых систем КА.

В стартовом положении $\varphi_{\text{н}}$ штанга (1) закреплена на опорном основании КА с помощью замка зачекочки (2). После расчеховки замок (2) освобождает штангу (1), которая под действием толкателя (3) и пружины кручения (на рис. 2.3 не показана), установленной в шарнире (4), поворачивается на угол φ и фиксируется в конечном угловом положении $\varphi_{\text{к}}$ с помощью защёлки (5) (на рис. 2.3 не показана).

Надёжность поворотной штанги с учётом (2.11) в общем случае можно преобразовать к виду

$$P = P(Y_{\text{п}}) \cdot P(Y_{\text{ф}}), \quad (2.12)$$

где $P(\cdot)$ – вероятность случайного события, описание которого дано в круглых скобках; $Y_{\text{п}}$ – событие, заключающееся в выполнении условий прочности штанги при эксплуатации; $Y_{\text{ф}}$ – событие: выполнение условий функционирования при переводе штанги из сложенного положения в рабочее.

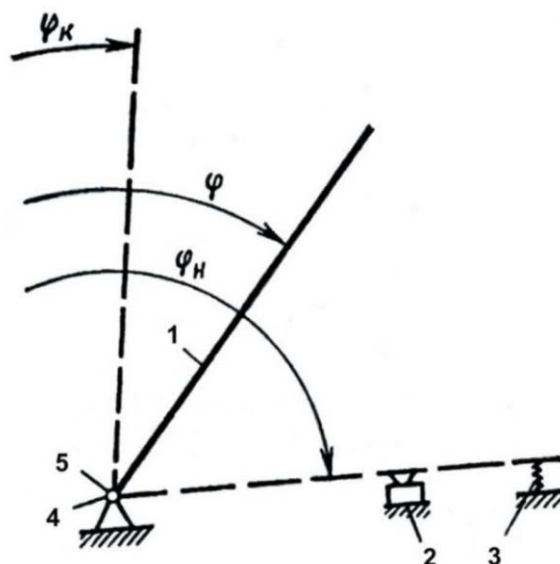


Рис. 2.3. Схема поворота штанги из стартового положения в рабочее положение

Надёжность по прочности в уравнении (2.12) определяется в общем виде как вероятность пересечения случайных событий, обусловленных различными предельными состояниями прочности штанги:

$$P_{\text{п}} = P(Y_{\text{п}}) = P(Y_1 \cap Y_2 \cap Y_3), \quad (2.13)$$

где Y_1, Y_2, Y_3 – случайные события, заключающиеся соответственно в том, что отсутствуют разрушения поворотной конструкции штанги (1), замка (2) и шарнира (4) на участке выведения; отсутствуют разрушения поворотной конструкции штанги (1), шарнира (4) и защёлки (5) при её раскрытии и зачековке; отсутствуют разрушения конструкции штанги (1), шарнира (4) и защёлки (5) при функционировании в раскрытом положении в течение САС.

Обеспечение прочности при эксплуатации штанги в общем случае для каждого из предельных состояний по прочности (2.13) выполняется при условии (знак функциональной зависимости от времени здесь и далее опущен)

$$N > R, \quad (2.14)$$

где N, R – действительные значения несущей способности штанги и внешних нагрузок.

Надёжность по прочности P_n определяется как вероятность соблюдения условий прочности (2.14) в течение наработки:

$$P_n = P(N > R). \quad (2.15)$$

Надёжность по функционированию в процессе поворота штанги в уравнении (2.12) определяется в общем виде как вероятность пересечения случайных событий, обусловленных предельными состояниями, которые соответствуют выполнению заданного алгоритма при функционировании штанги:

$$P = P(Y_\phi) = P(Y_4 \cap Y_5 \cap Y_6 \cap Y_7), \quad (2.16)$$

где Y_4, Y_5, Y_6, Y_7 – случайные события, заключающиеся соответственно в том, что произошла расчеховка (разрыв удерживающих связей в замке (2)); выполнено условие страгивания (срабатывание толкателя (3)); произошло раскрытие штанги (1) с требуемыми параметрами движения к моменту фиксации в раскрытое положение; сработало фиксирующее устройство (5) в шарнире (4).

Все процессы, связанные с функционированием штанги при повороте и фиксации в конечном положении (2.16), рассматриваются как следствия выполнения статического равновесия при вращательном движении

$$M_{дв}(\phi) - M_c(\phi) = 0 \quad \forall \phi \in [\phi_n, \phi_k], \quad (2.17)$$

где $M_{дв}(\phi)$ – действительные значения движущих моментов, создаваемых приводами раскрытия; $M_c(\phi)$ – действительные значения моментов сил сопротивления на пути движения поворотной штанги.

Исходя из (2.17) осуществление событий Y_4 – Y_7 (2.16) в процессе раскрытия штанги в общем виде возможно при условии соблюдения неравенства (знак функциональной зависимости от угла поворота здесь и далее опущен)

$$M_{дв} > M_c. \quad (2.18)$$

Вероятность любого из событий Y_4 – Y_7 и в целом процесса раскрытия штанги рассматривается как вероятность обеспечения требуемой энергии приводов раскрытия для преодоления моментов сил сопротивления на пути заданного движения.

Надёжность по функционированию P_ϕ в общем случае определяется как вероятность соблюдения условий функционирования (2.18) в каждом из угловых положений штанги

$$P_\phi = P(M_{дв} > M_c). \quad (2.19)$$

Таким образом, надёжность механических частей поворотной конструкции ЛА по методу А.А. Кузнецова определяется по формуле (2.11) с учётом (2.15) и (2.19).

2.7. Последующее развитие методики

А.А. Кузнецова

Исходя из приведённых выше методов расчёта ВБР изделий, чьи состояния характеризуются множеством параметров, определение их безотказности осуществляется на основе моделей, где локальные (частные) параметры, по которым можно различать отказы различных видов, могут быть сведены к обобщённым (комплексным) параметрам, характеризующим общий отказ изделия. В случае независимых отказов элементов при последовательном соединении, ВБР изделия определяется согласно известной формуле [89]:

$$P = \prod_{i=1}^n P_i, \quad (2.20)$$

где P_i – ВБР i -го элемента или подсистемы; n – число элементов или подсистем.

Идентичность формул (2.10) и (2.20) позволяет производить анализ и синтез моделей на основании практически любого числа параметров, характеризующих предельными состояниями, формально от 1 (обобщённый параметр) до ∞ (локальные параметры), соответственно модель надёжности изделия может содержать любое количество фиктивных элементов (подсистем).

В общей теории надёжности механических систем В.В. Болотина обобщённым параметром, определяющим безотказность изделия, является вектор качества, выход траектории которого за пределы области допустимых состояний квалифицируется как отказ; в параметрической надёжности А.С. Проникова – это общий вектор параметров, невыход которого за пределы области работоспособности не будет отказом по функционированию изделия в целом даже тогда, когда отдельные его выходные параметры вышли за пределы области работоспособности; в методике расчёта надёжности механических частей конструкций ЛА А.А. Кузнецова рассматривается параметр надёжности, обобщающий конструкционную прочность и функционирование при раскрытии поворотной конструкции.

Решение задач надёжности по прочности вероятностными методами возможно сегодня только для относительно простых конструкций, у которых известны законы распределения нагрузок и несущей способности. Расчётам параметров прочности при решении задач надёжности в стохастической постановке в технической литературе уделено достаточно много внимания, включая упомянутые работы В.В. Болотина, А.С. Проникова и А.А. Кузнецова [10–15], однако в ракетно-космической технике наиболее широкое распространение получили детерминированные методы расчётов на прочность [90], что позволяет существенно упростить расчёты полной надёжности МУ ОС.

Условие прочности (2.14) при детерминированном подходе имеет вид

$$N^{\text{мин}} > R^{\text{макс}}, \quad (2.21)$$

здесь $N^{\text{мин}} = N / n_3$, $R^{\text{макс}} = R \cdot f_6$,

где f_6 – коэффициент безопасности, n_3 – запас прочности.

Условие (2.21) может быть использовано при определении любого из предельных состояний по прочности, деформации или жёсткости. Коэффициенты безопасности f_6 и запасы прочности n_3 для каждого из расчётных случаев нагружения выбирают из нормированных значений согласно требованиям норм прочности КА, например по Государственному стандарту [90].

Считается, что при надлежащем выборе коэффициентов безопасности f_6 и запасов прочности n_3 , надёжность по прочности (2.15) при детерминированном подходе стремится к единице:

$$P_{\text{п}} = P\left(\frac{N}{n_3} > R \cdot f_6\right) \rightarrow 1. \quad (2.22)$$

Если события, обуславливающие работоспособность по прочности при детерминированных величинах несущей способности и нагрузок, обозначить A , а события, обуславливающие работоспособность по функционированию при случайных значениях движущих моментов и моментов сил сопротивления – B , то надёжность МУ ОС определяется надёжностью по функционированию (2.19) при условии обеспечения надёжности по прочности (2.22):

$$P_{\text{п}} = P(A) \rightarrow 1, P_{\text{ф}} = P(B), P = P_{\text{п}} \cdot P_{\text{ф}} \approx P_{\text{ф}},$$

или $P = P(B | A).$ (2.23)

Условие превышения движущего момента над моментом сил сопротивления на пути поворота конструкции в отечественной практике проектирования и конструирования МУ ОС поворотного типа принято определять в виде [28–30]

$$M_{\text{дв}} > k \cdot M_{\text{с}}, \quad (2.24)$$

где k – запас движущего момента, отражающий идею о необходимости разделения средних значений движущего момента и моментов сил сопротивления для повышения надёжности.

Для МУ ОС выдвигного типа в формуле (2.24) вместо движущих моментов используются движущие силы V , а вместо моментов сил сопротивления – силы сопротивления (резистивные силы) W :

$$V > k \cdot W, \quad (2.25)$$

где k – запас движущих сил (символ запасов движущих моментов и движущих сил на практике не принято различать).

2.7.1. Практика выбора значений запасов движущих моментов (сил)

В НПО ПМ (ныне АО «ИСС») запасы движущих моментов (сил) в подвижных механических узлах (шарнирах, парах трения и пр.) по сложившейся практике применения назначают из расчёта не менее 100 % (отношение 2:1) к худшему значению моментов сил сопротивления (резистивных сил). Это правило применялось в НПО ПМ до начала реализации совместных проектов с европейскими партнёрами по созданию спутников связи, первым из которых был КА Sesat (Siberian-European Satellite) (заказчик Eutelsat, производитель полезной нагрузки Alcatel Space, контракт подписан 04.08.1995, запуск аппарата состоялся 17.04.2000). Под влиянием требований европейских партнёров запасы движущих моментов стали назначать не менее 200 % (отношение 3:1), оставляя за собой право в некоторых случаях использовать запасы движущего момента не менее 100 % (отношение 2:1) в зависимости от динамики процессов раскрытия и наличия соответствующего подтверждённого опыта. Значения и условия выбора запасов движущих моментов (сил) в России не нормируются ни отраслевыми, ни государственными стандартами.

В США существует несколько иная практика. В 1975 г. там появился первый стандарт MIL-A-83577 (15 June 1975), предусматривающий наличие в подвижных механических узлах КА статических запасов движущих моментов и сил. Необходимые запасы в указанном стандарте рекомендовалось назначать в диапазонах от 100 до 200 % к худшему случаю резистивных моментов или сил. В случаях ограничений по весу и подтверждённой практике применения допускалось использовать запасы менее 100 %.

Для расчётов статических запасов в первом стандарте MIL-A-83577 и его второй редакции DOD-A-83577A (15 March 1978) использовали следующие формулы [91]:

$$\text{Static Torque Margin} = \left[\frac{\text{Drive Torque}}{\text{Resisting Torque}} - 1 \right] \times 100, \quad (2.26)$$

$$\text{Static Force Margin} = \left[\frac{\text{Drive Force}}{\text{Resisting Force}} - 1 \right] \times 100. \quad (2.27)$$

Формулы (2.24)–(2.25) и (2.26)–(2.27) указывают на принципиальную схожесть подходов по определению значений запасов движущих моментов (сил) в НПО ПМ с разработчиками подвижных механических узлов в США на начальном этапе их использования.

В третьей редакции стандарта MIL-A-83577B (01 Feb 1988) появилось разделение запасов движущих моментов (сил) на статистические и кинетические. При этом в формулах (2.26)–(2.27) по вычислению статических запасов приводных моментов и усилий были внесены уточняющие изменения:

$$\text{Static Torque Margin} = \left[\frac{\text{Drive Torque} - \text{Drive Torque Required for Acceleration}}{\text{Resisting Torque}} - 1 \right] \times 100,$$

$$\text{Static Force Margin} = \left[\frac{\text{Drive Force} - \text{Force Required for Acceleration}}{\text{Resisting Force}} - 1 \right] \times 100.$$

Кинетические запасы вращающихся моментов и усилий вычисляются по формулам

$$\text{Kinetic Torque Margin} = \left[\frac{\text{Drive Torque} - \text{Resisting Torque}}{\text{Torque Required for Acceleration}} - 1 \right] \times 100, \quad (2.28)$$

$$\text{Kinetic Force Margin} = \left[\frac{\text{Drive Force} - \text{Resisting Force}}{\text{Force Required for Acceleration}} - 1 \right] \times 100. \quad (2.29)$$

Также в новой редакции стандарта MIL-A-83577B появились рекомендации по выбору статических запасов моментов или усилий в зависимости от этапов выполнения проекта согласно табл. 2.3 [40].

Таблица 2.3

Требуемый статический запас по вращающему моменту или усилию в зависимости от этапов программы

Этап программы	Требуемый запас по вращающему моменту или усилию, %
Концептуальный анализ проекта	175
Рассмотрение эскизного проекта	150
Критический анализ проекта	125
Приемные/квалификационные испытания	100

Позднее утративший свою силу стандарт MIL-A-83577B был заменён стандартами AIAA S-114–2005 (American Institute of Aeronautics and Astro-

nautics, AIAA) [43] и NASA-STD-5017 (13 June 2006) (National Aeronautics and Space Administration, NASA) [44].

В стандарте AIAA S-114–2005 кинетические запасы названы динамическими с сохранением формул (2.28)–(2.29), а при вычислении статических запасов вернулись к формулам (2.26)–(2.27), при этом минимальные запасы по-прежнему рекомендуется выбирать согласно табл. 2.3.

В стандарте NASA-STD-5017 приведены три разновидности запасов – оперативный (2.30), удерживающий (2.31) и динамический (2.32):

$$\text{Operation Torque Margin} = \frac{\text{Available Driving Torque}}{\text{Total Resisting Torque}} - 1, \quad (2.30)$$

$$\text{Holding Torque Margin} = \frac{\text{Available Holding Torque}}{\text{Torque Applied at Limit Load}} - 1, \quad (2.31)$$

$$\begin{aligned} \text{Dinamic Torque Margin} = \\ = \frac{\text{Available Driving Torque} - \text{Total Resisting Torque}}{\text{Torque Required for Acceleration}} - 1. \end{aligned} \quad (2.32)$$

Для линейных устройств формулы по определению запасов идентичны (2.30)–(2.32), с заменой понятия *Torque* (вращающий момент) на понятие *Force* (сила).

Согласно общей отечественной и зарубежной практике рекомендуется выбирать запасы вращающих моментов (сил) для наихудших факторов, к числу которых, с учётом разъяснений, проведённых в стандарте [44], могут быть отнесены:

- условия окружающей среды;
- фрикционные эффекты;
- возможные изменения статического и динамического трения в процессе хранения;
- эффекты разрегулировки;
- запирающие усилия;
- сопротивление жгутов кабелей;
- торможения при демпфировании;
- тепловые эффекты и термонаведённые искажения;
- перекосы, вызванные нагрузками;
- изменения в смазке, включая ухудшения и исчерпания при наихудших случаях термовакуумных обстоятельств;
- искажающие эффекты, обусловленные жесткостями интерфейса и допустимыми отклонениями при монтаже;

- ухудшение трения из-за механического сжатия эластомеров;
- влияние давления жидкости на эластомеры в вязких демпферах;
- условия подачи питания на двигатель и управляющие параметры;
- ускорение из-за транспортных перемещений и маневров, которые могут тормозить развёртывание;
- минимально доступные приводные моменты и силы;
- эффекты старения материалов;
- механические деформации;
- износ;
- погрешности изготовления.

2.7.2. Идеология проектирования, основанная на методике А.А. Кузнецова

С учётом выводов (2.23) проектирование МУ ОС осуществляется так, что вначале обеспечивается прочность конструкции как первооснова её работоспособности, а затем – способность этой конструкции раскрываться в рабочее положение в виде принципиальной осуществимости процессов по изменению конфигурации согласно заранее определённому алгоритму. Выполнение условий прочности (2.21) при проектировании механических устройств должно производиться с учётом выбора параметров конструктивно-компоновочных и конструктивно-силовых схем, обеспечивающих заданные значения по ряду ограничений, включающих:

- заданные геометрические размеры и конфигурацию конструкции в рабочем положении;
- требуемую компактность складывания конструкций в сложенное положение при удовлетворении условий укладки РК в зоне полезного груза с учётом возможных деформаций конструкции под воздействием внешних нагрузок;
- установленные зоны и схемы раскрытия конструкций из стартового положения в рабочее с учётом ограничений со стороны смежных конструкций, например исключения зацеплений поворотных конструкций, и возмущающих воздействий на бортовое оборудование КА, например закрутки, как следствия процесса раскрытия;
- необходимые запасы прочности конструкции в зависимости от числа замков зачековки m в схеме закрепления конструкций к опорному основанию в стартовом положении исходя из принципа равнопрочного проектирования [92], в соответствии с которым надёжность удержания P_y , как функция несущей способности закрепляемой конструкции N в выражении (2.14) от числа замков m , обеспечивается близкой к надёж-

ности освобождения конструкции $P_{\text{ср}}$, как вероятности последовательно-го срабатывания m -замков:

$$P_y \approx P_{\text{ср}},$$

здесь $P_y = P[N(m) > R]$, $P_{\text{ср}} = \prod_{i=1}^m P_i$;

- допустимые парциальные частоты собственных колебаний в стартовом положении p по отношению к резонансным частотам внешних динамических воздействий $p_{\text{рез}}$ (например при расцепке ступеней ракеты-носителя):

$$p \neq p_{\text{рез}};$$

- минимальные значения парциальных частот собственных колебаний в рабочем положении $p_{\text{мин}}$ по отношению к допустимым значениям $p_{\text{доп}}$, накладываемым со стороны системы управления КА на орбите:

$$p_{\text{мин}} > p_{\text{доп}}.$$

В результате выполнения условий прочности (2.21) с учётом одновременного удовлетворения всех перечисленных ограничений создаётся силовая основа РК, в которую встраиваются приводы, обеспечивающие заданные процессы раскрытия в рабочее положение. Выбор приводов определяют исходя из обеспечения требуемых движущих моментов (сил), которые привод должен развить для выполнения условий перевода конструкций из сложенного положения в рабочее, например для приводов вращения (2.24) или для линейных приводов (2.25).

Исходя из сказанного следует, что надёжность (2.11) поворота штанги, показанной на рис. 2.3, как функция надёжности по прочности и по функционированию при раскрытии определяет проектный (желаемый) уровень надёжности

$$P(P_p, P_\phi) = P_\Pi. \quad (2.33)$$

Согласно (2.33) проектные решения по выбору параметров прочности и функционирования при раскрытии отражают выполнение условий (2.21) и (2.24), или (2.25). Очевидно, что при проведении конструкторской и технологической подготовки производства и при изготовлении МУ ОС ожидаемая надёжность (2.33) может снижаться из-за конструкторских, технологических и производственных ошибок. Под ошибкой здесь понимается любая из ошибок конструкторов, технологов и/или производственников в обобщённом понимании – как **человеческая ошибка**, т. е. «действие или бездействие человека, приводящее к непреднамеренному результату» [93]. В теории ошибок, разработанной James Reason [94], «ошибка рассматривается как следствие, объединяющее все те случаи, когда запланированная последовательность умственных или физических

усилий не достигает необходимой цели и когда все эти провалы не могут быть отнесены на счёт влияния случая». В той же работе делается важное заключение о главной роли человека в поддержании надёжности на примере современного самолёта: «Так как гражданский самолёт сконструирован для выполнения безопасных полётов в течение неограниченного периода времени, в случае если дефекты обнаруживаются и устраняются своевременно, безопасность становится вопросом определения и ремонта до отказа какой-либо конструкционной детали (структуры). В идеальной системе все дефекты, влияющие на безопасность полёта, должны определяться заранее до момента, когда они станут опасными и устранены эффективным ремонтом. С этой точки зрения мы изменили систему безопасности от одного из физических дефектов в самолете до одной из ошибок в комплексной системе с человеком в центре».

В результате совершения «человеческих» ошибок фактическая (полная) надёжность РК может оказаться ниже проектного уровня, рассчитанного только из обеспечения условий прочности и функционирования при раскрытии

$$P_{\text{РК}} \leq P_{\text{П}} = P_{\text{п}} \cdot P_{\text{ф}}. \quad (2.34)$$

Положим, что работоспособность РК, помимо обеспечения параметров прочности N , R и раскрытия $M_{\text{дв}}$, $M_{\text{с}}$, дополнительно определяется некоторыми параметрами $X_i \forall i = (\overline{1, n})$, которые зависят от конструкторских, технологических и производственных ошибок δ_i , вероятность совершения которых определяет надёжность $P(X_i) = P(\delta_i)$, связанную функцией ϕ с проектной надёжностью $P_{\text{П}}$ (2.33) и влияющую таким образом в целом на полную надёжность РК:

$$P_{\text{РК}} = \phi [P_{\text{П}}, P(X_i)]. \quad (2.35)$$

Если предположить, что проектирование, конструирование, технологическая подготовка и производство РК осуществляется разными людьми (коллективами людей), то проектная надёжность $P_{\text{П}}$ и надёжность $P(X_i)$, связанная с конструкторскими, технологическими и производственными ошибками, являются независимыми величинами, что позволяет представить формулу (2.35) в виде

$$P_{\text{РК}} = P_{\text{П}} \cdot P(X_i). \quad (2.36)$$

Из (2.36) следует, что если конструкторы, технологи и производственники не допустят ошибок в своей работе, то $P(X_i) = 1 \Rightarrow P_{\text{РК}} = P_{\text{П}}$. В противном случае параметры X_i , обусловленные конструкторскими, технологическими и производственными ошибками, будут влиять на надёжность наравне с параметрами прочности и функционирования при раскрытии.

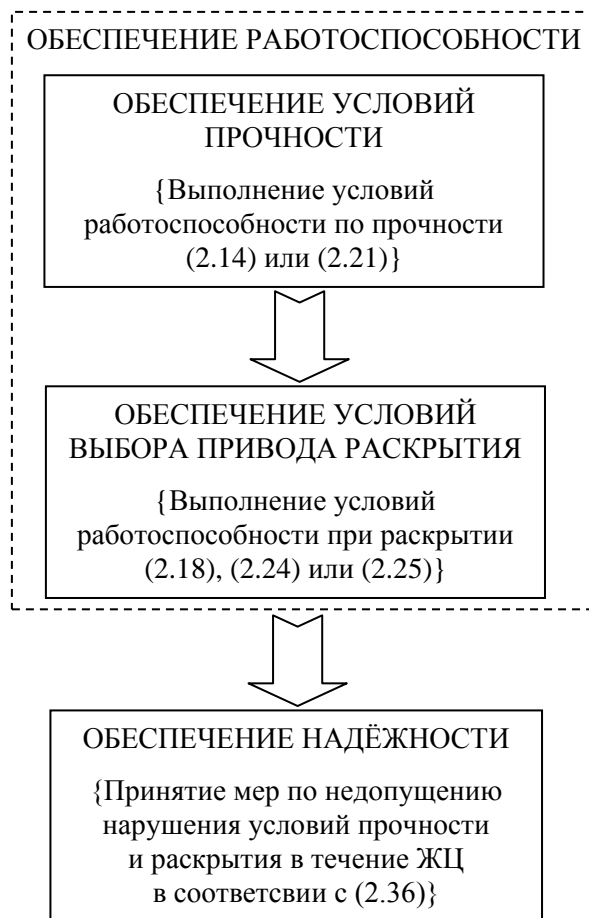


Рис. 2.4. Схема обеспечения надёжности в течение ЖЦ

Таким образом, идеология проектирования МУ ОС на основе методики А.А. Кузнецова является частью общей методики обеспечения надёжности в течение ЖЦ, приведённой на рис. 2.4.

На схеме отражено неписанное правило разработчиков РК, которое гласит, что *«проектируемое изделие должно быть, во-первых, прочным, чтобы не сломаться до или в процессе раскрытия, во-вторых, работоспособным, чтобы конструктивное исполнение позволяло осуществлять процесс раскрытия после воздействия полётных нагрузок, и, в-третьих, надёжным, чтобы обеспечить стабильность раскрытия от раза к разу в заданных режимах и условиях эксплуатации»* [95]. Соблюдение данного правила требует не только выбора проектных параметров конструкции, удовлетворяющих требованиям ТЗ, например в случае проектирования РК – это выполнение условий (2.21), (2.24) и/или (2.25), но и принятие мер по обеспечению их неизменности в процессе ЖЦ изделия, т. е. к недопущению конструкторских, технологических и производственных ошибок δ_i , способных привести к нарушению заданных показателей надёжности.

2.7.3. Особенности обеспечения работоспособности поворотных конструкций при стохастическом и детерминированном подходах

Допустим, что выполнение условия (2.24) производится на основе оценок стохастических параметров $M_{дв}(D)$ и $M_c(S)$, которые подчиняются нормальному закону распределения. В общем виде функции плотности вероятностей случайных величин определяют по формулам

$$f(D) = \frac{1}{\sigma_D \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left[-\frac{(D - m_D)^2}{2\sigma_D^2}\right], \quad (2.37)$$

$$f(S) = \frac{1}{\sigma_S \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left[-\frac{(S - m_S)^2}{2\sigma_S^2}\right], \quad (2.38)$$

где m_D, m_S – математические ожидания параметров распределения; σ_D, σ_S – среднеквадратические отклонения параметров распределения.

Предположим, что действительное значение S в формуле (2.38) может быть выражено с помощью запаса движущего момента k зависимостью

$$S^{\text{макс}} = k \cdot S, \quad (2.39)$$

тогда формулу (2.38) можно записать в виде

$$f(S^{\text{макс}}) = \frac{1}{k \cdot \sigma_S \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left[-\frac{(S^{\text{макс}} - k \cdot m_S)^2}{2k^2 \cdot \sigma_S^2}\right],$$

при этом разность $D - S^{\text{макс}}$ будет подчиняться нормальному закону распределения с математическим ожиданием и среднеквадратическим отклонением:

$$m_{D-S}^{\text{макс}} = m_D - k \cdot m_S,$$

$$\sigma_{D-S}^{\text{макс}} = \sqrt{\sigma_D^2 + k^2 \cdot \sigma_S^2}.$$

Вероятность превышения действительного значения D относительно предельного значения $S^{\text{макс}}$ определяется вероятностью

$$P = P(0 < D - S^{\text{макс}} < \infty) = \int_0^{\infty} f(z) dz = F_0\left(\frac{m_{D-S}^{\text{макс}}}{\sigma_{D-S}^{\text{макс}}}\right) = F_0(\gamma),$$

где $F_0 = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\gamma} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt$ – табулированная нормальная функция распределения; γ – числовой коэффициент, соответствующий требуемому уровню надёжности [96].

Исходя из того, что

$$\gamma = \frac{m_{D-S}^{\text{макс}}}{\sigma_{D-S}^{\text{макс}}} = \frac{m_D - k \cdot m_S}{\sqrt{\sigma_D^2 + k^2 \cdot \sigma_S^2}},$$

можно получить квадратное уравнение

$$ak^2 + bk + c = 0, \quad (2.40)$$

где $a = m_S^2 - \gamma^2 \cdot \sigma_S^2$, $b = -2m_D \cdot m_S$, $c = m_D^2 - \gamma^2 \cdot \sigma_D^2$.

Максимальное значение $S^{\text{макс}}$ в уравнении (2.39) соответствует только одному из решений квадратного уравнения (2.40):

$$k = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2ac},$$

которое можно преобразовать к виду [97]

$$k = \frac{m_D}{m_S} \cdot \alpha, \quad (2.41)$$

здесь $\alpha = \frac{1 + \gamma \sqrt{A_D^2 + A_S^2 - \gamma^2 A_D^2 A_S^2}}{1 - \gamma^2 A_S^2}$,

где $A_D = \sigma_D / m_D$, $A_S = \sigma_S / m_S$ – коэффициенты вариации.

Из формулы (2.41) следует, что, например при $k = 3$, невозможно однозначно утверждать о выполнимости условия по заданному запасу движущего момента не менее 200 % (отношение 3:1) без проведения статистических испытаний для определения параметров случайного распределения D и S , причём очевидно, что при $A_S > 1/\gamma$ не существует конструкций, имеющих гауссовый уровень надёжности γ .

Допустим, известны параметры функций плотности вероятностей случайных величин (2.37)–(2.38): $m_D = 5 \text{ Н} \cdot \text{м}$, $m_S = 1,5 \text{ Н} \cdot \text{м}$, $\sigma_D = \sigma_S = 0,1 \text{ Н} \cdot \text{м}$, тогда запас движущего момента, определённый исходя из действительных значений математических ожиданий параметров случайного распределения D и S , показывает, что условие по запасу движущего момента $k > 3$ формально выполнено:

$$k = m_D / m_S = 3,33 > 3.$$

Однако обеспечение минимально допустимой надёжности РК на уровне 0,999 возможно только при значении коэффициента γ не менее 3,1, что соответствует значению сомножителя в формуле (2.41) $\alpha = 1,2696$, при котором запас движущего момента должен быть не ниже $k_\alpha = 4,23$.

При детерминированном подходе (в случае усечения функций плотности вероятностей момента сил сопротивления $M_c^{\text{макс}}$ – справа и движущего момента $M_{\text{дв}}^{\text{мин}}$ – слева) выражение (2.18) может быть преобразовано к виду, аналогичному (2.21):

$$M_{\text{дв}}^{\text{мин}} > M_c^{\text{макс}}, \text{ или } \frac{M_{\text{дв}}^{\text{мин}}}{M_c^{\text{макс}}} > 1. \quad (2.42)$$

Формула (2.42) удобна для практического применения в случае использования пружинных приводов раскрытия, поскольку минимальное значение движущего момента $M_{\text{дв}}^{\text{мин}}$ может быть получено напрямую из силовой диаграммы, которая, как правило, приводится в чертеже на изготовление пружины или торсиона.

Типовая зависимость между $M_{\text{дв}}(\varphi)$ и $M_c(\varphi)$ в случае раскрытия поворотной конструкции с помощью торсионов или пружин кручения показана на рис. 2.5. Максимальные моменты сил сопротивления реализуются в начале поворота конструкции за счёт преодоления трения покоя в шарнире $M_{c.п}$ и в конце поворота за счёт дополнительного сопротивления фиксаторов конечного положения $M_{c.ф}$, в то время как движущий момент, создаваемый пружиной, монотонно убывает к концу раскрытия от $M_{\text{дв}}(\varphi_n)$ до $M_{\text{дв}}(\varphi_k)$.

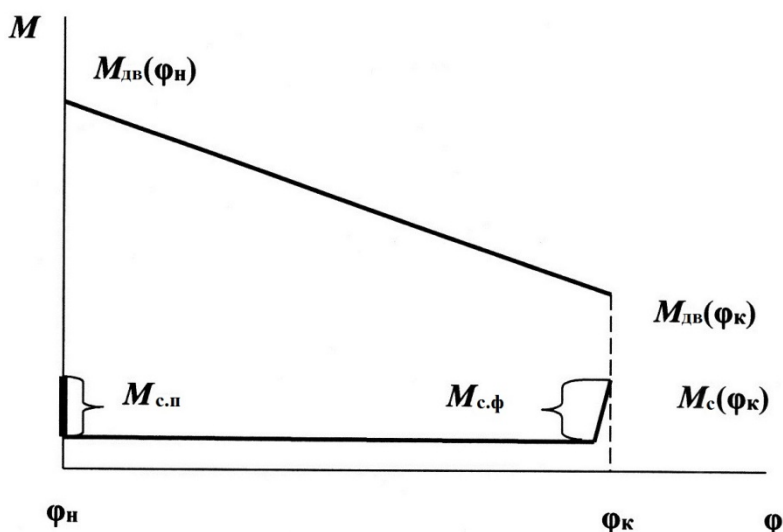


Рис. 2.5. График зависимостей движущего момента и момента сил сопротивления

Максимальное значение момента сил сопротивления $M_c^{\text{макс}}$ заранее неизвестно, поскольку определяется условиями и режимами эксплуатации поворотной конструкции в космическом пространстве, однако известно, что действительные значения моментов сил сопротивления в ШУ имеют явно выраженную зависимость от температуры внешней среды. Коэффициенты трения скольжения ТСП в парах трения и жёсткость транзитных электрических кабелей, как правило, увеличиваются при изменении температур внешней среды от $T_{\text{тепло}}^{\text{макс}}$ до $T_{\text{холод}}^{\text{макс}}$. Максимальное действительное значение момента сил сопротивления в ШУ $M_{\text{с.действ}}^{\text{макс}}$ может быть определено в результате проведения наземных испытаний поворотной конструкции с транзитными электрическими кабелями при аномально низкой температуре $T_{\text{холод}}^{\text{макс}}$, соответствующей условиям эксплуатации. Если за действительное значение момента сил сопротивления принять максимальное его значение при аномально низкой температуре

$$M_c = M_{\text{с.действ}}^{\text{макс}} (T_{\text{холод}}^{\text{макс}}), \quad (2.43)$$

то максимальное значение момента сил сопротивления $M_c^{\text{макс}}$ в формуле (2.42) с учётом (2.43) можно определить соотношением

$$M_c^{\text{макс}} = k \cdot M_{\text{с.действ}}^{\text{макс}} (T_{\text{холод}}^{\text{макс}}). \quad (2.44)$$

Иллюстрацией применимости детерминированного подхода (2.42) с учётом (2.44) может служить рис. 2.6.

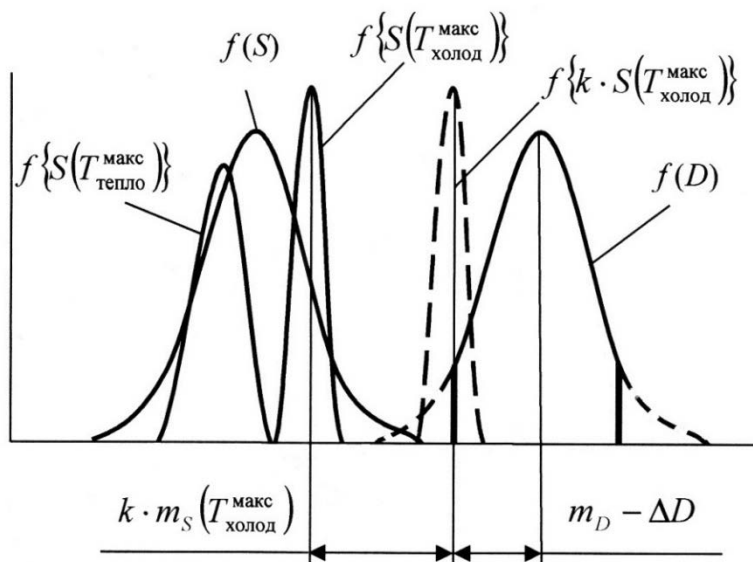


Рис. 2.6. Плотности вероятностей распределения $M_c(S)$ при аномальных значениях температур внешней среды и $M_{\text{дв}}(D)$ для торсиона

На рис. 2.6 показаны плотности вероятностей распределения $M_c(S)$ при аномальных значениях температур внешней среды и $M_{дв}(D)$ для торсиона, чья функция плотности вероятности усечена слева и справа, что соответствует нижним и верхним допускам на его изготовление.

Таким образом, выражение (2.42) с учётом (2.44) может быть преобразовано к виду:

$$\frac{M_{дв}^{мин}}{k \cdot M_{с.действ}^{макс} \left(T_{холод}^{макс} \right)} > 1, \quad (2.45)$$

здесь $M_{с.действ}^{макс} \left(T_{холод}^{макс} \right) = m_S \left(T_{холод}^{макс} \right)$, $M_{дв}^{мин} = m_D - \Delta D$,

где m_S , m_D – математическое ожидание момента сил сопротивления и движущего момента; ΔD – нижний допуск на движущий момент торсиона согласно чертежу.

Значения M_c могут быть определены экспериментально после изготовления опытного образца (макета) штанги при испытаниях в соответствии со схемой, приведённой на рис. 2.7. Согласно схеме испытаний (рис. 2.7), штанга раскрывается в рабочую конфигурацию (рабочее положение), а затем принудительно переводится в стартовую конфигурацию (стартовое положение) с помощью технологических электромеханических приводов и тросо-блочной системы с фиксацией усилий отпускания и натяжения троса в зависимости от направления и угла раскрытия штанги φ .

Натяжение троса осуществляется путём принудительного наматывания троса на барабан технологического привода, а отпусkanie троса производится путём разматывания троса с барабана при реверсном включении технологического привода под действием движущего момента от собственного привода штанги, при этом предполагается, что значения $M_{дв}$ и M_c не зависят от направления вращения, скорости и реакций в ШУ.

Исходя из баланса сил и моментов составляют условия равновесия для случаев отпусkania и натяжения троса (здесь и далее функциональная зависимость моментов и сил от угла раскрытия штанги φ не указана):

$$M_{от} + M_{со} - M_{дв} - M_{сдо1} = 0, \quad (2.46)$$

$$M_{нат} + M_{сн} - M_{дв} - M_{сдн1} = 0, \quad (2.47)$$

где $M_{от}$, $M_{нат}$ – моменты в ШУ штанги при отпускации и натяжении троса; $M_{со}$, $M_{сн}$ – моменты сил сопротивления в ШУ штанги при отпускации и натяжении троса; $M_{дв}$ – движущий момент в ШУ штанги, подлежащий определению; $M_{сдо1}$, $M_{сдн1}$ – моменты сил сопротивления в шарнире технологического диска (3) при отпускации и натяжении троса, приведенные к оси вращения шарнира диска (2).

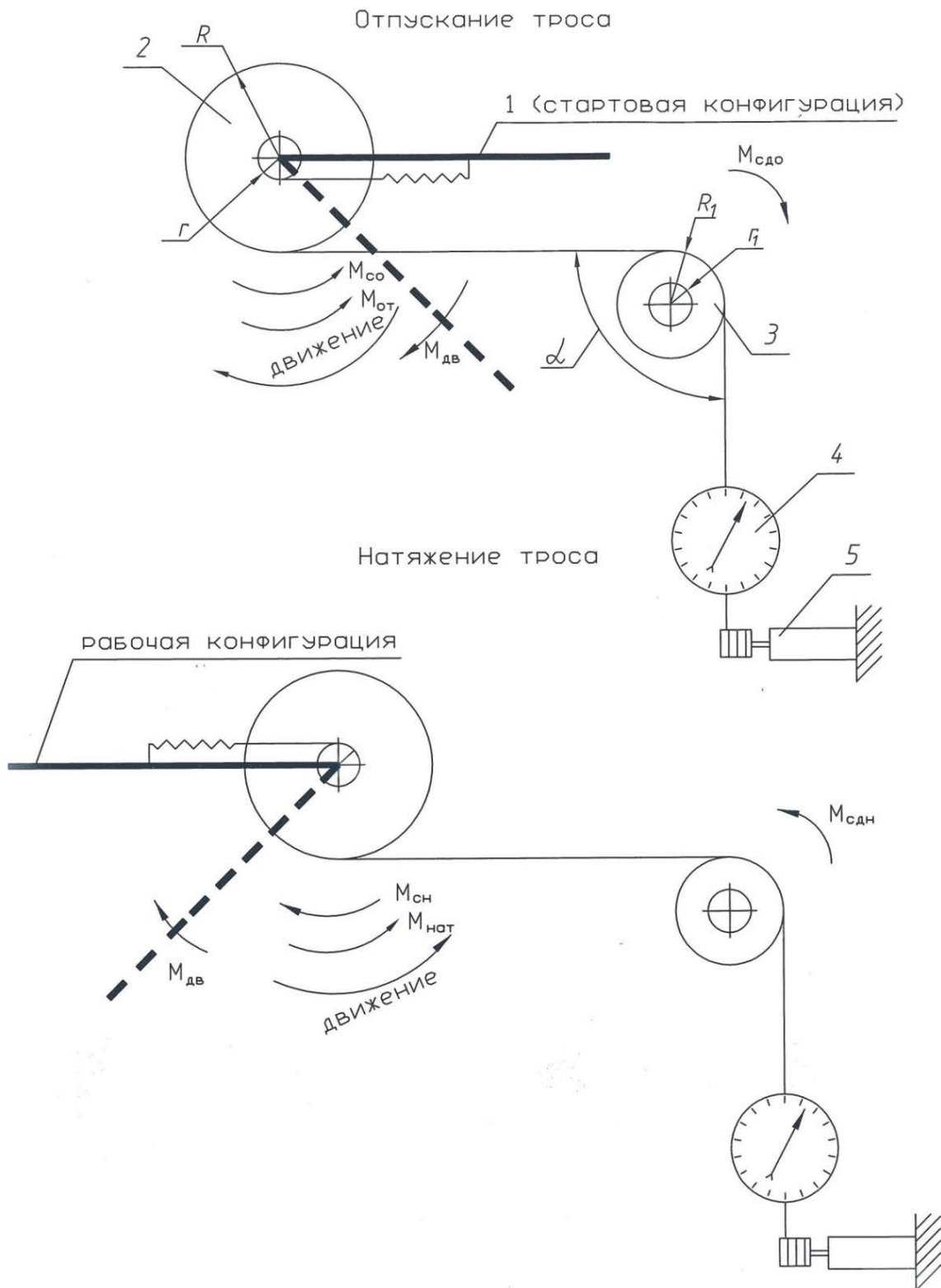


Рис. 2.7. Схема измерения усилия натяжения в тросе при принудительном переводе поворотной штанги из стартовой конфигурации в рабочую и обратно: 1 – поворотная штанга, 2 – технологический диск, совмещённый с осью вращения штанги, 3 – промежуточный поворотный диск, 4 – динамометр, 5 – технологический привод

Моменты, входящие в уравнения (2.46)–(2.47), можно выразить через усилия отпускания $P_{от}$ и натяжения троса $P_{нат}$, регистрируемые с помощью динамометра (4) следующим образом:

$$M_{со} = M_c - P_{от} \cdot r \cdot \mu, \quad (2.48)$$

$$M_{сн} = M_c - P_{нат} \cdot r \cdot \mu, \quad (2.49)$$

$$M_{сдо} = 2P_{от} \cdot r_1 \cdot \mu_1 \cdot \cos(\alpha/2), \quad (2.50)$$

$$M_{сдн} = 2P_{нат} \cdot r_1 \cdot \mu_1 \cdot \cos(\alpha/2), \quad (2.51)$$

$$M_{сдо1} = M_{сдо} \cdot R / R_1, \quad (2.52)$$

$$M_{сдн1} = M_{сдн} \cdot R / R_1, \quad (2.53)$$

$$M_{от} = P_{от} \cdot R, \quad (2.54)$$

$$M_{нат} = P_{нат} \cdot R, \quad (2.55)$$

где r, r_1 – радиусы шарниров; R, R_1 – радиусы технологических дисков; μ, μ_1 – коэффициенты трения в шарнирах; $M_{сдо}, M_{сдн}$ – моменты сопротивления в шарнире технологического диска (3) при отпуске и натяжении троса; M_c – момент сил сопротивления в ШУ поворотной штанги, подлежащий определению.

Поочерёдно складывая и вычитая уравнения (2.46)–(2.47) с учётом формул (2.48)–(2.55), можно получить движущие моменты привода и моменты сил сопротивления в шарнире штанги:

$$M_{дв} = \frac{1}{2} \left[M_{нат} + M_{от} + (P_{нат} - P_{от}) \cdot \left(r \cdot \mu + 2r_1 \cdot \mu_1 \cdot \cos \frac{\alpha}{2} \cdot \frac{R}{R_1} \right) \right], \quad (2.56)$$

$$M_c = \frac{1}{2} \left[M_{нат} - M_{от} + (P_{нат} + P_{от}) \cdot \left(r \cdot \mu + 2r_1 \cdot \mu_1 \cdot \cos \frac{\alpha}{2} \cdot \frac{R}{R_1} \right) \right]. \quad (2.57)$$

Путём подбора радиусов технологических дисков (2, 3) и снижения коэффициента трения в шарнире промежуточного поворотного диска можно производить регулировку погрешности определения $M_{дв}$ и M_c .

В случае закрытия и отпускания штанги технологическими приводами, создающими «чистые» крутящие моменты [80], формулы (2.56)–(2.57) преобразуются к своему упрощённому виду, что одновременно служит выражениями для приближённого вычисления $M_{дв}$ и M_c :

$$M_{дв} = \frac{M_{нат} + M_{от}}{2},$$

$$M_c = \frac{M_{\text{нат}} - M_{\text{от}}}{2}. \quad (2.58)$$

Для определения максимального значения момента сил сопротивления $M_{\text{с.действ}}^{\text{макс}}(T_{\text{холод}}^{\text{макс}})$ по формуле (2.57) или (2.58) испытания проводят в термокамере (термобарокамере), где с требуемой точностью создаются аномально низкие температуры, имитирующие натурные тепловые воздействия условий космического пространства.

2.7.4. Физический смысл запаса движущего момента (сил)

Запас движущих моментов (сил) характеризует требуемое соотношение движущих моментов (сил) и моментов сил сопротивления (резистивных сил) для обеспечения заданной надёжности с учётом наихудших факторов. Указанное соотношение присуще исключительно качественно изготовленным МУ ОС при разбросах его параметров в пределах установленных допусков на изготовление согласно НТД, КД и ТД:

- для движущих моментов (сил) – это разброс усилий пружин вследствие допустимых параметров изготовления пружин (диаметров пружинной проволоки, диаметров и длины пружины), вариации физико-механических свойств материала пружин и их изменение в условиях эксплуатации, разброс плеч приложения усилий пружин в пределах технологических допусков на изготовление;

- для моментов сил сопротивления (резистивных сил) – это разброс силовых факторов, величины которых меняются при изменении параметров окружающей среды и режимов силового взаимодействия, а также разброс геометрических размеров в пределах технологических допусков на изготовление, характеризующих места приложения сил (например, радиусы осей шарниров, плечи действия сил).

Запасы движущего момента (сил) характеризуют свойство обеспечивать энергетическую достаточность приводов для преодоления сопротивлений в механизмах раскрытия при перемещении подвижных элементов в любой фазе движения. Необходимость назначения требуемых запасов движущих моментов для приводов при проектировании РК обусловлена прогнозируемо допустимыми разбросами физико-механических свойств конструкционных материалов и геометрических характеристик конструкции, а также изменением под воздействием вариаций известных ФКП, другими словами – случайных комбинаций известных факторов [97].

Важно подчеркнуть универсальность запаса движущего момента (сил) как интегральной характеристики качества изготовления изделий.

Запас движущего момента – это величина, отражающая состояние физических свойств и характеристик материалов и конструкций в пределах допустимых вариаций параметров состояния механизма, условий и режимов его эксплуатации. Ни в коем случае недопустимо рассматривать запас движущих моментов (сил) как возможность накопления ошибок и дефектов производства и как повод для послаблений производственной дисциплины. При этом важно понимать, что выбросы значений запасов движущих моментов (сил) способны указать на возможные ошибки и дефекты при изготовлении механических устройств. Именно поэтому запас движущих моментов может быть использован как критерий качества изготовления МУ при проведении *приёмо-сдаточных испытаний* (ПСИ) и как критерий отсутствия повреждений и дефектов по итогам проведения НЭО.

Запас движущего момента является всего лишь одной из характеристик свойств, обеспечивающих надёжность функционирования механизмов, например, наряду со свойством обеспечивать свободу вращения в шарнирах, которое достигается при наличии гарантированных радиальных зазоров с учётом полей допусков на изготовление шарниров и фактической толщиной нанесённого слоя ТСП в парах трения. Формально запас движущего момента будет величиной, зависящей от наличия радиальных зазоров в шарнирах, но при повышенных требованиях надёжности указанные характеристики необходимо рассматривать изолированно, поскольку они имеют разную физическую природу.

При отсутствии радиального зазора в шарнире вращение невозможно, а запас движущего момента характеризует процесс движения в шарнире, т. е. по определению условие, при котором существует радиальный зазор. В логике причинно-следственных связей наличие радиального зазора в шарнирах – это необходимое условие для обеспечения определённого запаса движущего момента. Если, исходя из заданных технологических допусков, минимальный радиальный зазор в паре вращения составляет, например, 20 мкм, а толщина нанесённого слоя ТСП на ось – 11 мкм, то свободное вращение в шарнире невозможно (номинальный натяг в сопряжении – 2 мкм). В этом случае на практике производится притирка пары трения, в результате чего часть лишней смазки вытесняется из зоны сопряжения трущихся деталей. Критерием наличия радиального зазора обычно служит равномерный поворот под действием собственного веса охватываемой детали, или выпадение оси из отверстия под действием собственного веса. При этом остаётся неизвестным, каково фактическое значение радиального зазора в паре трения (1, 5, 10 мкм или какое-либо другое значение) и какова вероятность исчезновения данного зазора (фактически – условия вращения) в процессе эксплуатации при заданных режимах и условиях хранения, транспортирования и применения. Например, за счёт

гигроскопичности ТСП при хранении в складских условиях, смятия контактных поверхностей при транспортировании, наволакивания смазочного слоя при вращении подшипника или тепловых деформаций в условиях применения. Таким образом, в логике верификации требований надёжности, помимо обеспечения заданных значений запасов движущих моментов, наличие гарантированных радиальных зазоров в парах трения должно быть доказано в явном виде как обособленный фактор, а не как следствие косвенных признаков его существования.

Значения радиальных зазоров Δ выбирают из условия принципиальной возможности осуществления вращения в шарнире без заеданий и заклиниваний:

$$\Delta = \delta - 2\delta_n - \delta_d > 0, \quad (2.59)$$

где δ – минимальный зазор в сопряжении между осью поворотного узла и обоймой подшипника без учёта ТСП; δ_n – максимальная толщина ТСП с учётом его возможных изменений в процессе эксплуатации; δ_d – предельное значение тепловых деформаций в радиальном зазоре при объёмном расширении (сжатии) ШУ или при короблениях в случае наличия градиентов температур в конструкции.

Условие соблюдения радиального зазора в шарнире (2.59) имеет вид

$$\Delta \in [\Delta_{\min}, \Delta_{\max}] \quad \forall \Delta > 0. \quad (2.60)$$

Верхнюю границу допустимого значения радиального зазора Δ_{\max} можно выбирать исходя из риска возникновения отказов, связанных с нарушением условий эксплуатации при вибрациях в сложном положении РК, например из-за динамических ударов при наличии недопустимых люфтов в шарнирах либо невыполнением требований по точности позиционирования в рабочем положении.

Рассмотрим в качестве примера нарушение стабильности параметра δ_n (2.59) в случае применения в конструкциях ШУ шарнирных подшипников типа Ш ГОСТ 3635 [98] с нанесённой на внутреннюю поверхность наружного кольца слоя ТСП толщиной, рекомендованной стандартом ОСТ 92-4556 [99]. Особенностью указанных шарнирных подшипников является наличие двух диаметрально расположенных цилиндрических поясков на сфере внутреннего кольца, предназначенных для сборки подшипника. Наличие цилиндрических поясков приводит к образованию двух диаметрально расположенных полостей в сопряжении наружного и внутреннего колец подшипника.

В случае создания движущего момента в шарнире с помощью пружин растяжения, его величина равна

$$M_{\text{дв}} = N \cdot L,$$

где N – сила пружины растяжения; L – расстояние от точки приложения силы до оси вращения шарнира.

Сила пружины N действует на ось вращения подшипника как радиальная сила, которая при вращении в шарнире меняет вектор действия. При этом момент сил сопротивления вращению от действия радиальной силы N равен

$$M_c = N \cdot r \cdot \mu, \quad (2.61)$$

где μ – коэффициент трения скольжения в подшипнике; r – радиус оси вращения подшипника.

При вращении шарнирного подшипника возможно состояние, при котором вектор радиальной силы \vec{N} может совпасть с какой-либо из граней, образованной цилиндрическим пояском и сферой внутреннего кольца (рис. 2.8). При совпадении вектора силы \vec{N} с любой из граней цилиндрического пояса внутреннего кольца, смещаясь в радиальном зазоре, стремится внедриться своей гранью в слой ТСП (рис. 2.9).

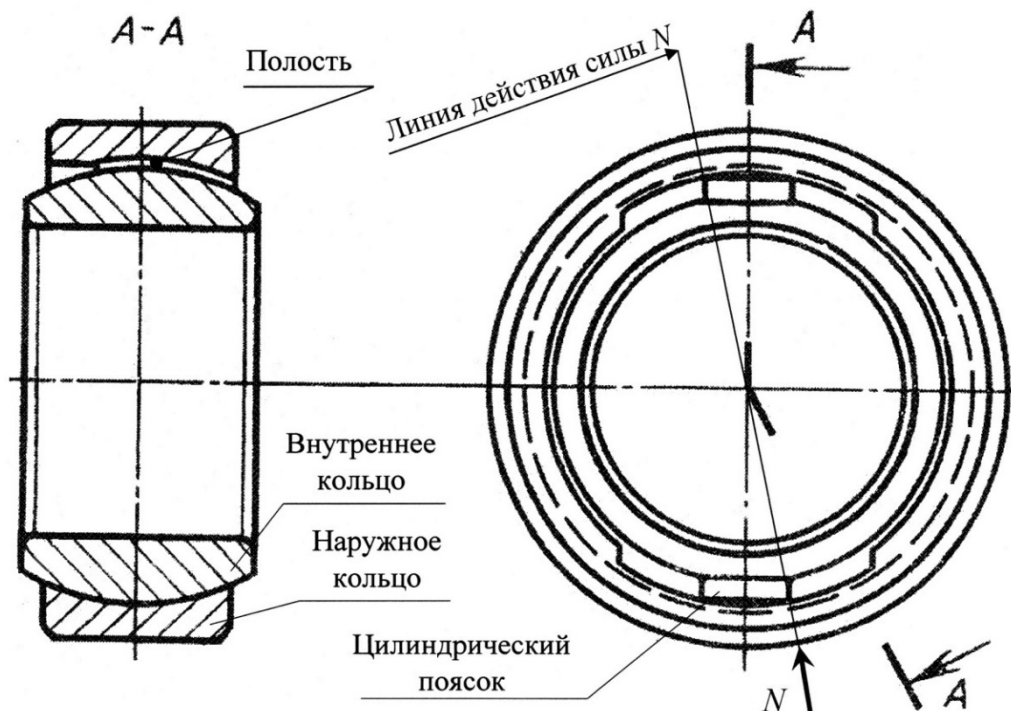


Рис. 2.8. Схема нагружения шарнирного подшипника

При указанном позиционировании вектора силы \vec{N} и сферы внутреннего кольца в начальный момент поворота конструкции в ШУ может возникнуть эффект «скребка», сдвигающего смазку под действием радиального усилия в полость, образованную цилиндрическим пояском внутреннего кольца и сферой наружного кольца в радиальном зазоре подшип-

ника, в результате чего радиальный зазор Δ может исчезнуть. Приведённый пример характерен для использования твёрдых смазок на основе дисульфида молибдена, где между слоями атомов молибдена и серы существуют весьма слабые силы Ван-дер-Ваальса, которые позволяют слоям легко сдвигаться друг относительно друга [100]. Эффект «скребка» носит ярко выраженный стохастический характер и может вызвать внезапное скачкообразное повышение момента сил сопротивления в ШУ относительно значений, вычисленных по формуле (2.61).

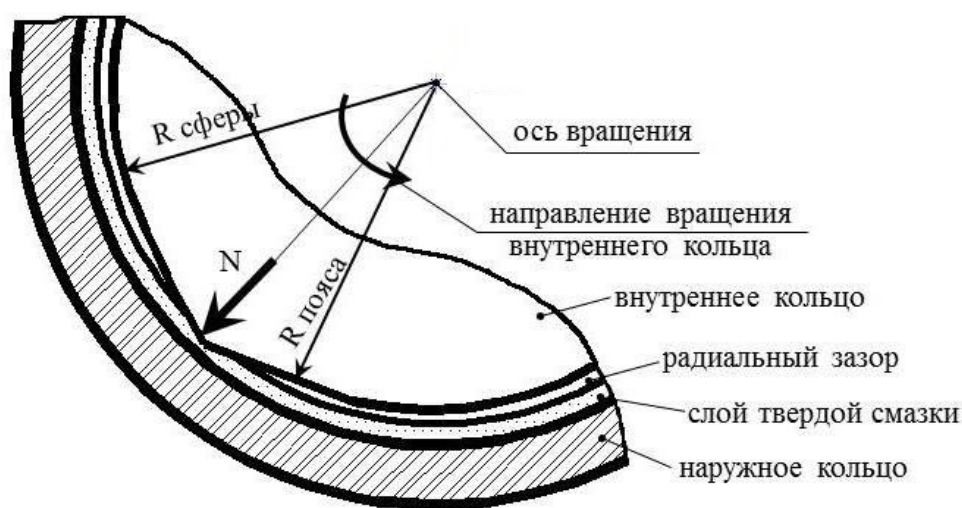


Рис. 2.9. Схема возникновения эффекта «скребка» в радиальном зазоре шарнирного подшипника

Для предотвращения эффекта «скребка» в случае применения приводов, создающих радиальную силу N на ось подшипника, необходимо позиционировать наружное и внутреннее кольца шарнирного подшипника в стартовом положении поворотной конструкции так, чтобы исключить совпадение вектора радиальной силы от привода с гранями цилиндрического пояса внутреннего кольца подшипника в начале и конце поворота, когда в соответствии с рис. 2.5 моменты сил сопротивления сами по себе имеют пиковые значения $M_{с.п}$ и $M_{с.ф}$.

Сохранение зазоров (2.59) в ШУ при функционировании является одним из важнейших условий работоспособности МУ ОС. Как следует из отчёта Aerospace Corporation за 2008 г., анализы аномальных инцидентов с подвижными механическими узлами КА показали, что из 164 наземных и 24 орбитальных случаев отказов большинство из них (до 47 % от общего числа) были связаны с потерей зазоров [101].

Таким образом, в формуле (2.36), помимо проектной надёжности, определённой с учётом выполнения условий прочности и запасов движу-

щих моментов, следует, как минимум, учитывать надёжность, связанную с вероятностью сохранения радиального зазора в шарнире вращения при наработке (2.59)–(2.60):

$$P(X_i) = P(0 < \Delta < \Delta_{\text{макс}}). \quad (2.62)$$

Выявленная необходимость учёта дополнительных факторов (2.60) при анализах надёжности, помимо выполнения условий прочности (2.14) или (2.21), и функционирования при раскрытии (2.24) и/или (2.25), обусловлена неправомерным применением термина «функционирование» только к процессам раскрытия, связанным с соблюдением определённых соотношений движущих моментов и моментов сил сопротивления при поворотах. Термин «функционирование» имеет расширенное толкование как *«выполнение в объекте (системе) процесса (процессов), соответствующего (соответствующих) заданному алгоритму¹ и (или) проявление объектом заданных свойств»* [103; 104]. Очевидно, что обеспечение прочности как «проявление объектом заданных свойств» является также функционированием, причём разрушение можно трактовать как отказ вследствие «нарушения работоспособного состояния объекта» по условиям прочности.

Таким образом, под функционированием в широком смысле, по мнению автора, следует понимать последовательное выполнение в МУ ОС процессов, соответствующих заданному алгоритму, например последовательность изменения состояний при эксплуатации в стартовом положении, раскрытии и функционировании в рабочем положении, последовательность раскрытия в рабочее положение и т. п., и проявление ими при этом заданных свойств, например прочности, структурности, деформативности, точности, жёсткости и т. п. Таким образом, функционирование можно рассматривать как результат изменения свойств изделия при осуществлении последовательных смен состояний², приводящих к соответствующим событиям³. В этом случае возникает возможность создать модель функционирования МУ ОС, учитывающую полное параметрическое описание по аналогии с методиками В.В. Болотина и А.С. Проникова, которое включает реконфигурирование конструкций в процессе эксплуатации.

¹ Под термином «алгоритм» понимается последовательность действий (операций) [102].

² Термин «состояние» – это категория научного познания, характеризующая способность движущейся материи к проявлению в различных формах с присущими им существенными свойствами и отношениями [105].

³ Событие – всякий факт, который в результате опыта может произойти или не произойти. Каждому из таких событий можно поставить в соответствие определенное число, называемое его вероятностью и являющееся мерой возможного совершения этого события [106].

2.8. Обобщённая параметрическая модель надёжности функционирования

Сложность определения параметров X_i в формуле (2.36) связана с многомерностью задачи надёжности в условиях реконфигурирования изделия с переменной структурой, когда изделие какое-то время функционирует в одной конфигурации, затем производится раскрытие и изделие начинает функционировать в другой конфигурации, принципиально отличающейся от начальной линейными размерами, граничными условиями закрепления, прочностью, режимами эксплуатации, нагрузками и внешними воздействиями. Безотказность раскрытия в этом случае приобретает особое значение, поскольку отказ делает бессмысленным функционирование изделия в первоначальной конфигурации и невозможным последующее функционирование в новой. Вопросы прочности в данном случае отходят на второй план, не теряя при этом своей значимости, а на первый план выступают комплексные задачи конструирования, механики, физики, трибологии и прочих инженерных и научных дисциплин, обеспечивающих заданный процесс раскрытия.

Важным и желаемым обстоятельством при этом является обеспечение и оценка надёжности функционирования изделия в целом, исходя из единой модели надёжности, дающей возможность увязать показатели надёжности с конкретными количественными параметрами конструкции, которые позволяют формулировать конструкционные требования к надёжности вновь создаваемых объектов и оценивать их уровень для подтверждения соответствия требуемому уровню. Фактически задача ставится так, чтобы на основании анализов и оценок надёжности можно было принять инженерные и конструкторские решения, направленные на то, что конкретно нужно изменить в конструкции изделия, чтобы повысить его безотказность на несколько пунктов (как это сегодня происходит при решении задач прочности).

Рассмотрим модель функционирования МУ ОС в рамках определения термина «модель» как *«сущности, воспроизводящей явление, объект или свойство объекта реального мира»* [102] и соответствующую ей математическую модель надёжности как *«модель, в которой сведения об объекте моделирования представлены в виде математических символов и выражений»* [102].

Исходя из определения термина [103; 104], функционирование МУ ОС представляется как процесс последовательных изменений состояний объекта в условиях внешних воздействий и режимов работы, в результате которого проявляются его заданные свойства. Каждое из таких состояний S_j может характеризоваться множеством устойчивых значений пе-

ременных параметров x_i , которые по отдельности и все вместе присущи каждому из состояний и лишь изменяют свои значения в процессе функционирования:

$$S_j = \{x_i\} \quad \forall i = (\overline{1, n}), \quad \forall j = (\overline{1, k}).$$

Предположим, что в процессе функционирования объект какое-то время находится в компактно сложенном состоянии, например, его хранят в складских условиях, а затем транспортируют к месту выполнения целевой задачи, связанной с изменением своей конфигурации подобно робототехническому комплексу одноразового действия. В начальный момент времени $t_1 = 0$ (до начала хранения и транспортирования) объект будет в исходном состоянии S_1 (состояние поставки с завода-изготовителя). В процессе хранения и транспортирования, включая полёт в составе РН, объект в период времени $0 \leq t \leq t_2$ изменяет своё состояние под воздействием климатических факторов и нагрузок до S_2 (меняются физико-механические и трибологические характеристики материалов, возникают необратимые деформации конструкционных материалов, проявляются дефекты изготовления, сборки, монтажа и настроек и т. п.). После реконфигурации в момент времени t_3 состояние объекта меняется, а он продолжает функционировать в состоянии S_3 (в объекте произошли структурные изменения взаимоположений и взаимосвязей элементов его конструкции).

Схема изменения состояний объекта при функционировании показана на рис. 2.10.

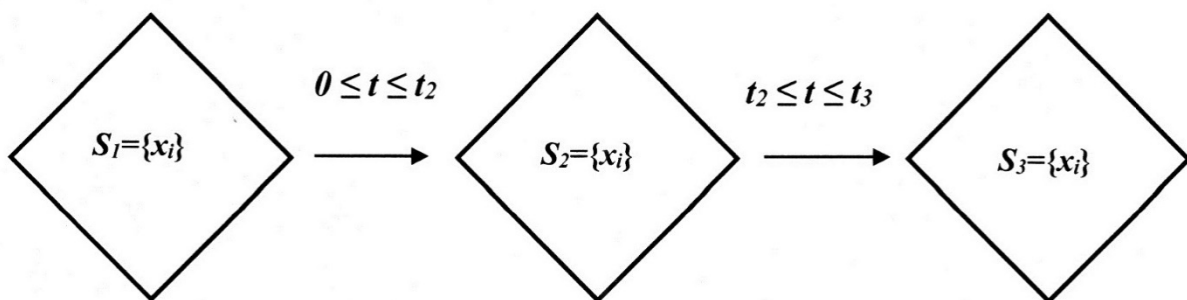


Рис. 2.10. Схема изменения состояний объекта при функционировании

Переход из одного состояния объекта в другое при функционировании сопровождается изменениями значений параметров x_i , при этом общее состояние системы S определяется выражением

$$S = \bigcap_{j=1}^k S_j.$$

Траектории изменения во времени каждого из параметров $x_i(t)$ при переходе из состояния в состояние образуют многомерный случайный процесс, который принадлежит области возможных состояний объекта E :

$$S = \{x_i(t)\} \in E. \quad (2.63)$$

В общем случае область возможных состояний E может существовать в области объединения множеств допустимых Ω и недопустимых N состояний:

$$E = \Omega \cup N.$$

Причём при соблюдении условия $E \subset \Omega$, изделие будет функционировать нормально, а если область возможных состояний E в процессе наработки выйдет за пределы области допустимых состояний Ω в область недопустимых состояний N :

$$E \setminus \Omega,$$

то изделие прекратит функционирование (откажет).

На рис. 2.11 с помощью диаграммы Венна представлена модель отказов.

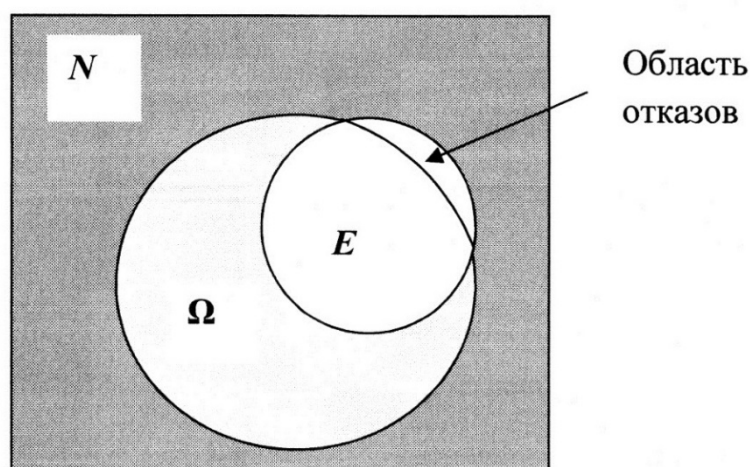


Рис. 2.11. Диаграмма Венна, иллюстрирующая модель отказов

Надёжность изделий в общем случае определяется выражением

$$P = P(E \cap \Omega).$$

Если рассматривать изменение значений действительного параметра x_i на траектории функции $x_i(t) \in E$, то изделие будет функционировать нормально вплоть до достижения любого из предельных состояний (2.5),

ограничивающих область допустимых состояний Ω для указанного параметра.

В общем случае траектория изменения функции случайного параметра физического процесса $x_i(t)$ за период времени $t \in [t_1, t_2]$ в области допустимых состояний Ω показана на рис. 2.12.

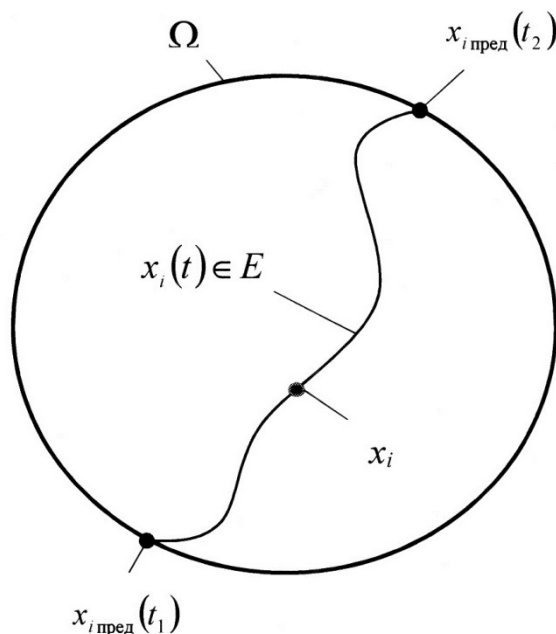


Рис. 2.12. Траектория изменения случайного параметра физического процесса в области допустимых значений

Рассмотрим допустимые изменения параметров физических процессов, обеспечивающих выполнение условий прочности (2.14) и функционирования при раскрытии (2.18).

Для выполнения условия прочности в качестве параметра физического процесса, определяющего допустимые состояния изделия, можно использовать напряжение в материале конструкций при силовом нагружении $x_i(t) = \sigma(t)$. Если параметр $x_i(t)$ на рис. 2.12 изменяется во времени так, что $x_{i\text{пред}}(t_1) = x_i^{\text{мин}}$, а $x_{i\text{пред}}(t_2) = x_i^{\text{макс}}$, то в общем случае одно из предельных состояний будет соответствовать допустимому пределу прочности, например, временному сопротивлению $x_i^{\text{макс}} = \sigma_B$, а другое предельное состояние будет определяться допустимой массой $M^{\text{доп}}$, при которой изделие не может работать эффективно из-за недозагрузки, что соответствует условию $x_i^{\text{мин}} = \sigma(M^{\text{доп}})$. Таким образом, выполнение условия прочности (2.14) обеспечивается при нахождении допустимых напряжений в диапазоне

$$\sigma(M^{\text{доп}}) \leq \sigma(t) \leq \sigma_B. \quad (2.64)$$

Если масса изделия не является определяющим фактором, например при решении задачи надёжности, то условие (2.64) принимает вид

$$\sigma(t) \leq \sigma_{\text{в}}.$$

Для выполнения условия функционирования при раскрытии в качестве параметра физического процесса, определяющего допустимые состояния изделия, используется движущий момент при повороте в ШУ $x_i(t) = M_{\text{дв}}(t)$. Если параметр $x_i(t)$ на рис. 2.12 изменяется во времени так, что $x_{i \text{ пред}}(t_1) = x_i^{\text{макс}}$, а $x_{i \text{ пред}}(t_2) = x_i^{\text{мин}}$, то в общем случае одно из предельных состояний будет соответствовать максимально допустимому моменту сил сопротивления, при переходе через которое поворот в ШУ окажется невозможным $x_i^{\text{мин}} = M_{\text{с}}^{\text{макс}}$, а второе предельное состояние будет определяться минимально допустимым моментом сил сопротивления, при котором изделие не превысит предела прочности $\sigma^{\text{пред}}$ из-за резкой остановки в момент фиксации в рабочее положение $x_i^{\text{макс}} = M_{\text{с}}^{\text{мин}}(\sigma^{\text{пред}})$. Выполнение условия (2.18) обеспечивается при движущем моменте, которое определяется неравенством

$$M_{\text{с}}^{\text{макс}} \leq M_{\text{дв}}(t) \leq M_{\text{с}}^{\text{мин}}(\sigma^{\text{пред}}). \quad (2.65)$$

Если прочность конструкции при фиксации в рабочем положении не является определяющим фактором, например при раскрытии жёсткой конструкции или при раскрытии конструкции с помощью управляемых спусковых механизмов, обеспечивающих минимальные угловые скорости движения [69], то условие (2.65) принимает такой вид:

$$M_{\text{дв}}(t) \geq M_{\text{с}}^{\text{макс}}.$$

В общем случае для любых параметров физических процессов $x_i(t) \in E$, образующих область допустимых состояний Ω , нормальное функционирование будет происходить при выполнении условия

$$x_i^{\text{мин}} \leq x_i(t) \leq x_i^{\text{макс}}. \quad (2.66)$$

Показатель надёжности ϕ , который может быть задан некоторым функционалом Φ , определённым на траектории функции изменения параметра $x_i(t)$, определяется как математическое ожидание от функционала Φ :

$$\phi = M \{ \Phi [x_i(t)] \}.$$

Если функционал Φ определить таким образом, что он равен 0, если (хотя бы при одном значении $\tau \leq t$) траектории $x_i(t)$ пересекут границу по-

верхности, образованную областями допустимых Ω и неработоспособных N состояний, и равен 1, если не пересекут, то получим показатель надёжности в виде ВБР изделия на интервале времени $[0, t]$:

$$M \{ \Phi [x_i(t)] \} = P(t),$$

где $P(t)$ – функция надёжности как вероятность нахождения параметров $x_i(t)$ в области допустимых состояний Ω .

Предположим, что с помощью некоторого оператора системы L все состояния объекта $S = \{x_i(t)\} \in E$ могут быть выражены через обобщённый параметр качества v , соответствующий множеству действительных значений параметров $\{x_i\}$, то

$$v = L \cdot S.$$

В этом случае функционирование реконфигурируемого изделия (2.63) совместимо с идеей, положенной В.В. Болотиным в основу общей теории надёжности механических систем с конечным числом степеней свободы [10], согласно которой надёжность рассматривается как эволюция элемента качества $v(t)$ в допустимой области состояний Ω .

Очевидно, что с учётом (2.66) область допустимых состояний Ω для многомерного случайного физического процесса определяется выражением

$$\Omega = \left\{ x_i(t) \mid x_i^{\min} \leq x_i(t) \leq x_i^{\max} \right\} \forall i = (\overline{1, n}). \quad (2.67)$$

Из формулы (2.67) видно, что в ней отсутствует элемент качества $v(t)$, который есть в (2.7), а допустимая область состояний определяется исключительно выходными параметрами физической системы. Попробуем объяснить причину такого несоответствия. В.В. Болотин исходил из того, что область допустимых состояний Ω с учётом технологических, эксплуатационных требований и возможностей вычислительных средств выбираются в области пространства качества V , которая связана определёнными операторными соотношениями с областями входных Q и выходных U параметров, характеризующих физические процессы [10]. Рассмотрим в каком отношении находятся области V , Q и U на примере выполнения условий (2.64) и (2.65), но при этом (чтобы не нарушать логику изложения В.В. Болотина и принятые в настоящем тексте обозначения) условимся считать $x \in U$.

Для выполнения условия (2.64) выбор размеров поперечных сечений силовых элементов конструкции должен производиться исходя из предельного состояния по прочности. Например, если работа конструкции рассматривается только под действием растягивающих усилий, то, исходя из заданного значения величины действующей силы R и предела прочно-

сти при растяжении σ_v , можно вычислить расчётное значение площади поперечного сечения элементов конструкции $F_{\text{расч}}$, при котором достигается предельное состояние конструкционного материала по прочности:

$$F_{\text{расч}} = R / \sigma_v.$$

В процессе конструирования всегда существуют ограничения по выбору геометрических размеров конструкции, связанные с выполнением требований по унификации и стандартизации конструкторских, технологических и производственных решений, к числу которых относятся выпускаемые промышленностью сортаменты проката, условия применимости материалов на предприятии, системы допусков и посадок, технологические процессы при изготовлении деталей и т. п. В результате этих ограничений размеры поперечного сечения силовых элементов конструкции устанавливаются в КД таким образом, чтобы при действующей силе R и допустимой прочности используемого материала σ_v фактическая площадь поперечного сечения $F_{\text{факт}}$ с учётом указанных ограничений была больше расчётного значения $F_{\text{факт}} > F_{\text{расч}}$. В результате установления фактических размеров поперечного сечения в конструкции, соответствующих площади поперечного сечения $F_{\text{факт}}$, действующее напряжение σ_d при заданной силе растяжения R будет меньше допустимого напряжения σ_v . Как видно из данного примера, процедура по выбору размеров поперечных сечений силовых элементов конструкции осуществляется с учётом параметров области пространства качества V , связанных с реальными возможностями производства, которые согласованы с одним из выходных параметров области U – действующим напряжением σ_d .

Выполнение условия (2.65) в процессе конструирования производится с учётом выполнения требований по унификации выходных характеристик привода из имеющегося номенклатурного ряда так, чтобы подходящий привод из этого ряда обладал движущим моментом $M_{\text{дв}}^{\text{пр}}$ [97], для которого выполняется условие:

$$M_c^{\text{макс}} < M_{\text{дв}}^{\text{пр}} < M_c^{\text{мин}}(\sigma^{\text{пред}}).$$

Аналогичным образом (с учётом выполнения требований по унификации и стандартизации) устанавливаются параметры конструкции при выборе выходных параметров оборудования, покупных изделий, крепежа, метизов, конструктивных соединений деталей и узлов и т. п., при этом множество параметров конструкции X_i , например, σ_d , $M_{\text{дв}}^{\text{пр}}$ и т. п., образуют область фактических состояний конструкции, или просто состояний конструкции G_k , выходные параметры которой (X_i) соответствуют её конст-

руктивному, технологическому и производственному состоянию, обеспеченному соответствующими параметрами качества:

$$G_k = \{X_i\} \quad \forall i = (\overline{1, n}).$$

Если параметры конструкции X_i согласовать с параметрами возможных состояний физических процессов x_i должным образом, то при нормальном функционировании изделия всегда соблюдается условие

$$G_k \in \Omega. \quad (2.68)$$

На рис. 2.13 показано одно из возможных положений областей состояний конструкции G_k и допустимых состояний Ω , которые спроецированы на траекторию функции случайного параметра физического процесса $x_i(t) \in E$.

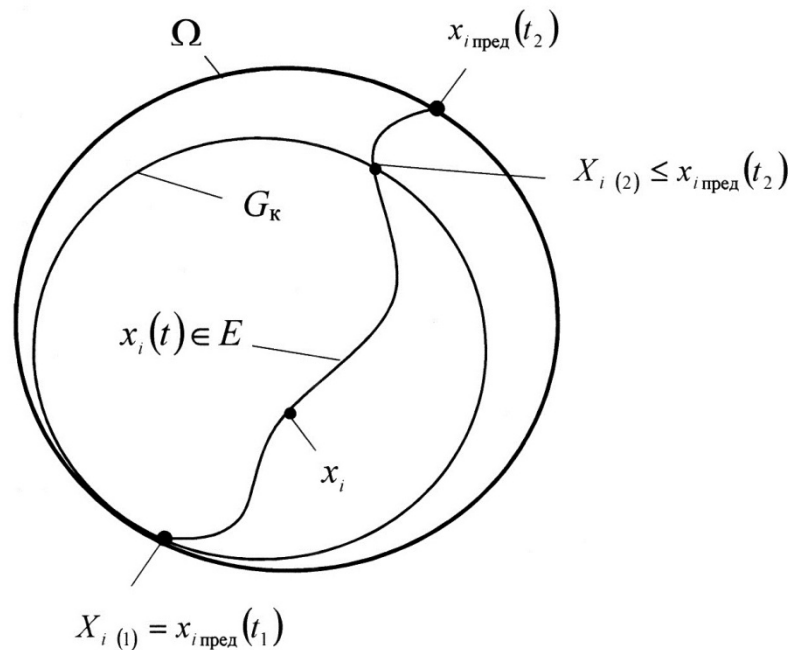


Рис. 2.13. Изменение траектории случайного параметра в областях состояний конструкции и допустимых состояний физических процессов

Соблюдение условий унификации и стандартизации приводит к тому, что на траектории случайного параметра $x_i(t)$ появляются текущие значения $X_{i(1)}$ и $X_{i(2)}$, которые соответствуют параметрам конструкции при заданных значениях параметров входного пространства Q с учётом ограничений, связанных с выполнением условий по унификации и стандартизации конструкторских, технологических и заводских решений (области пространства качества V). Каждый из параметров конструкции

$X_i \in G_k$ находится в области допустимых состояний Ω и в общем виде определяется соотношением:

$$x_{i \text{ пред}}(t_1) \leq X_i \leq x_{i \text{ пред}}(t_2).$$

Важным выводом из рис. 2.13 является то, что конструкция будет работать в облегченных условиях, когда выполняются неравенства

$$X_{i(1)} > x_{i \text{ пред}}(t_1) \text{ и } X_{i(2)} < x_{i \text{ пред}}(t_2). \quad (2.69)$$

Выполнение условий (2.69) соответствует запасам конструкции по предельным состояниям, например запасу прочности n_3 при выполнении условия прочности (2.21).

Появление области состояний конструкции G_k объясняет принцип взаимодействия области пространства качества V с областями входных Q и выходных U параметров. Любые процессы в технических объектах можно представить взаимосвязью входных и выходных параметров посредством операторных соотношений. На уровне физических процессов оператор отношений выражает существующую взаимосвязь между операндами, а на уровне технико-экономических процессов определяет взаимосвязь, которая фактически реализуется в области пространства качества с учётом конструкторских, технологических и производственных ограничений. Приведём примеры:

- при выполнении условия (2.64) нагрузка (растягивающая сила) является входным параметром области пространства Q , напряжение будет выходным параметром пространства U , а установленные в КД геометрические размеры поперечных сечений силовых элементов (с учётом возможностей производства) – параметрами области пространства качества V ;
- при выполнении условия (2.65) момент сил сопротивления является входным параметром области пространства Q , движущий момент есть выходной параметр области пространства U , а фактический движущий момент, который развивает привод, выбранный из существующего модельного ряда исполнения (типов) приводов, – параметром области пространства качества V ;
- при выполнении условия (2.60) внешние условия и воздействия определяют входные параметры области пространства Q , радиальный зазор будет выходным параметром области пространства U , а установленные в КД допуски и посадки при изготовлении пар трения, технологическое исполнение требований по нанесению ТСП и выбор типа подшипника – всё это относится к параметрам области пространства качества V , при которых реализуется фактическое значение радиального зазора в шарнире.

Таким образом, область состояний конструкции G_k полностью характеризует область пространства качества V и при этом находится внутри

области допустимых состояний Ω . Если бы технологии разработки и создания технических объектов позволяли реализовать конструкции так, чтобы при протекании в них физических процессов выходные параметры конструкции X_i строго соответствовали предельным состояниям параметров физических процессов x_i , то рассмотрение области пространства качества V не имело бы никакого смысла. На сегодняшний день примером таких технологий, позволяющих изготавливать изделия «строго в размер», являются аддитивные технологии [107].

Значит, функция надёжности (2.7) при реализации физических процессов в **конструкции готового изделия**, в котором учтены параметры области качества V , выглядит следующим образом:

$$P(t) = P\{x_i(t_1) \in \Omega; t_1 \in [0, t]\}. \quad (2.70)$$

Формула (2.70) характеризует допустимую область состояний для физических процессов, не ограниченных спецификой разработки и создания технических объектов. С учётом такой специфики (вместо областей допустимых состояний Ω) в технике принято использовать область работоспособных состояний G [12]. Генезис различия между областями допустимых и работоспособных состояний кроется в определении термина «работоспособность» как *«состояния объекта, при котором значения всех параметров, характеризующих способность выполнять заданные функции, соответствуют требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации»* [82]. То есть при употреблении понятия «область работоспособного состояния» понимается не допустимая область изменения значений **физических параметров** системы $x_i(t)$, а допустимая область изменения значений **параметров конструкции** $X_i(t)$, которые обеспечивают её работоспособность в соответствии с требованиями НТД и КД.

С учётом области состояния конструкции G_k , обусловленной наличием области пространства качества V , и области работоспособных состояний G , определяемых требованиями НТД и КД, допустимое изменение параметров конструкции $X_i(t)$ показано на рис. 2.14.

Поскольку параметры конструкции X_i , принадлежащие области её состояния G_k , и предельные значения параметров конструкции $X_{i \text{ пред}}$, ограничивающие область работоспособных состояний G , устанавливаются при проектировании и конструировании, то рис. 2.14 отображает **модель процесса конструирования**, в отличие от **модели процесса изменения допустимых физических состояний** объекта с учётом состояния конструкции, приведённой на рис. 2.13. Разница между указанными моделями определяется тем, что во втором случае рассматривается протекание физических процессов в готовом изделии при эксплуатации, а в первом

случае производится выбор параметров конструкции исходя из модели физических процессов воздействия на изделия и требований на его проектирование.

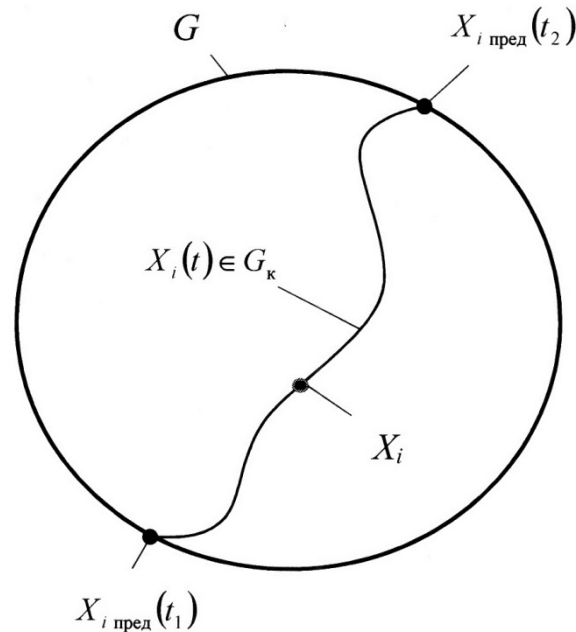


Рис. 2.14. Траектория допустимого изменения параметров конструкции в области работоспособных состояний

В процессе разработки изделий на этапах проектирования и конструирования [108] вместо (2.68) используют условие

$$G_k \in G. \quad (2.71)$$

При этом предельные значения параметров конструкции $X_{i \text{ пред}}$, которые задаются в ТЗ, определяются выражением

$$X_{i \text{ пред}} = \begin{cases} X_i^{\text{мин}} \geq x_i^{\text{мин}} \\ X_i^{\text{макс}} \leq x_i^{\text{макс}} \end{cases}. \quad (2.72)$$

Для выполнения условия (2.71) случайные параметры физических процессов $x_i(t) \in E$ выражают через параметры конструкции $G_k = \{X_i\}$, которые приводят к детерминированному виду с помощью оператора отношений L , входных q и выходных параметров x :

$$X_i = x_i, \quad (2.73)$$

здесь $x_i = L \cdot q_i$.

При рассмотрении состояния изделия по прочности с помощью напряжения в качестве выходного параметра оператор отношений L определяется произведением коэффициента K , зависящего от размеров попереч-

ных сечений конструкций [109], например для растягиваемого стержня $K = 1/F$, и коэффициента безопасности f_6 , который «учитывает неточность теоретического и экспериментального определения нагрузок и несущей способности, а также случайный разброс этих нагрузок» [90].

В ракетно-космической технике значения коэффициента безопасности f_6 принято назначать от 1,2 до 1,5, что эквивалентно ВБР в пределах 0,999 9–0,999 999 9 [110]. Кроме того, для высокоответственных элементов крепления и при использовании материалов, имеющих повышенный разброс прочностных характеристик, допускается введение дополнительного коэффициента безопасности f_6^* :

$$f_6^* \geq 1,2. \quad (2.74)$$

Дополнительный коэффициент безопасности является множителем к коэффициенту безопасности f_6 [90].

При рассмотрении состояния изделия по функционированию при раскрытии с помощью движущего момента в качестве выходного параметра, оператором отношений L выступает запас движущего момента k , который является множителем к моменту сил сопротивления (нагрузке).

При совмещении модели процесса изменения допустимых физических состояний объекта с учётом состояний конструкции, приведённой на рис. 2.13, и модели процесса конструирования, показанной на рис. 2.14, видно, что во время проектирования и конструирования использование области работоспособных состояний возможно, если соблюдено условие:

$$G \in \Omega. \quad (2.75)$$

С учётом (2.66), (2.72), (2.75) и терминологического определения понятия «работоспособное состояние», выражение для области работоспособных состояний G принимает такой вид:

$$G = \left\{ X_i \mid X_i^{\min} \leq X_i \leq X_i^{\max} \right\} \forall i = (\overline{1, n}). \quad (2.76)$$

Физический смысл использования области работоспособных состояний G вместо области допустимых состояний Ω объясняется следующим образом. Как известно [10], граница области допустимых состояний Ω формируется пространствами входных Q и выходных U параметров, а также пространством качества V , которые носят стохастический характер изменения, и в общем случае $\Omega(t)$. Граница же области работоспособного состояния G для данного конкретного изделия не может изменяться, поскольку она задана в ТЗ на проектирование и строго определена выбором конструкционных материалов, схемных, конструкторских и технологиче-

ских решений, заданными условиями и режимами эксплуатации. Таким образом, в первом случае речь идёт о допустимых границах изменений траектории параметров физических процессов, связанных с вероятностным поведением системы, а во втором – о детерминированных ограничениях, изначально накладываемых на систему, в границах которых допускаются стохастические изменения параметров конструкции при наработке. Важным дополнением служит и тот факт, что когда в ТЗ заданы повышенные требования к конструкции, лежащие за пределами физических возможностей материалов, т. е. $G \setminus \Omega$, необходимо осуществлять поиск новых материалов с повышенными удельными характеристиками или технологий их изготовления, подбирать соответствующие конструктивно-компоновочные и конструктивно-силовые схемы либо производить подобные действия до выполнения условия (2.75).

Исходя из рис. 2.12–2.14, области Ω и G определяются множествами параметров $\{x_i(t)\}$ и $\{X_i(t)\}$, которые должны быть попарно согласованы так, чтобы каждому элементу одного множества был определён и строго соответствовал элемент другого множества:

$$\{x_i(t)\} \subseteq \{X_i(t)\}. \quad (2.77)$$

Одно из возможных положений областей G и Ω в общем случае с учётом (2.68), (2.71), (2.75) и (2.77) показано на рис. 2.15. Причём область Ω , относящаяся к физическим процессам, изображена пунктирной линией, а область G – к техногенным процессам – сплошной линией.

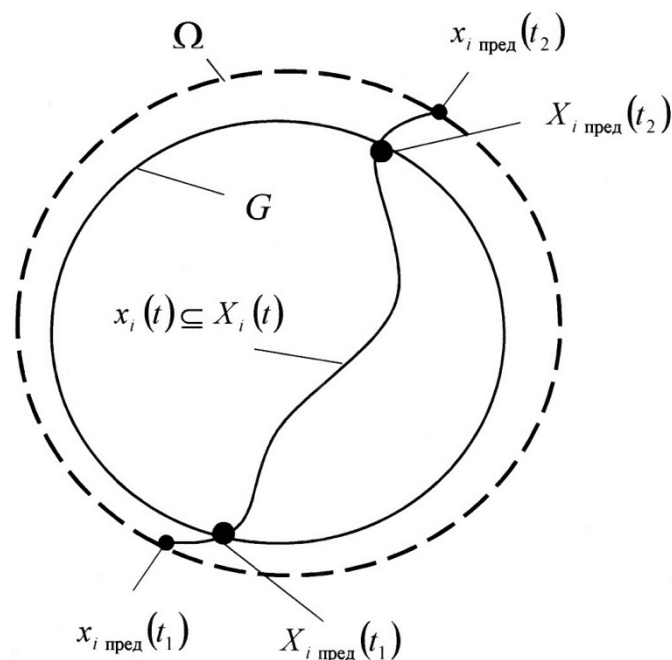


Рис. 2.15. Одно из возможных положений областей G и Ω

Отмеченное на рис. 2.15 различие областей G и Ω объясняется тем, что человек способен создать только подобие физического мира в виде технических объектов, условия построения которых были весьма удачно определены русским философом А.А. Богдановым. Человек может создать только то, действия чего он понимает как работу механизма: «*“Механическая сторона жизни” – это просто всё то, что в ней объяснено. “Механизм” – понятая организация, и только. Машина потому “не более, как механизм”, что её организация выполнена людьми и, значит, принципиально им известна*» [111]. Следовательно, любой технический объект обладает строго определёнными размерами и функциональностью – ровно такими, какими их задумал человек, а работоспособное состояние любого технического объекта согласно своему терминологическому определению характеризуется релевантностью значений его параметров с требованиями НТД и/или КД.

С учётом положения областей состояния изделия, показанных на рис. 2.15, надёжность изделия определяется в виде

$$P = P(G \cap \Omega),$$

при этом функция надёжности (2.70) может быть выражена формулой

$$P(t) = P\{X_i(t) \in G; t_1 \in [0, t]\}. \quad (2.78)$$

При использовании формулы (2.78) допускается выход параметров конструкции $X_i(t)$ за пределы области G , который вплоть до достижения соответствующих предельных состояний $x_{i \text{ пред}}(t)$ рассматривается как функциональная избыточность изделия.

Таким образом, при разработке любого изделия многомерный случайный процесс изменения его возможных состояний E всегда должен быть изначально ограничен областью работоспособных состояний G , что характеризует понимание разработчиком принципов его организации и функционирования, условий и режимов эксплуатации, технологических и производственных возможностей изготовления и т. п. За пределами указанного понимания обеспечить заданную надёжность изделия невозможно.

На практике любое множество параметров изделия может быть разбито на подмножества, удовлетворяющие **принципу разнотипности**, который «*состоит в целенаправленном использовании разных по своей природе (принципу действия) компонентов (систем, подсистем, элементов, технологий, сырья различного происхождения, моделей, алгоритмов, программных компонентов и т. д.), которые выполняют одинаковые функции, при этом каждый из них может использоваться отдельно (независимо), но их одновременное использование и взаимодействие исключает повторение отказов по общей причине*» [112], например

$$E = (M, L, T, W_t, W_i, W_v, \dots). \quad (2.79)$$

Значит, элементами множества (2.79) могут выступать вещественные, пространственные, временные, тепловые, электрические, механические характеристики соответственно, а многоточие свидетельствует о возможном расширении списка характеристик [113].

Таким образом, если области возможных состояний E (2.63) и работоспособных состояний G (2.76) для поворотной штанги (см. рис. 2.3) представить только с учётом зависимостей параметров согласно (2.21), (2.42) и (2.60), то они могут быть определены следующим образом:

$$E^* = [R(t), M_c(t), \Delta(t)], \quad (2.80)$$

$$G^* = \left\{ \begin{array}{l} N_{\text{мин}} < N \\ M_{\text{дв}}^{\text{мин}} < M_{\text{дв}} \\ 0 < \Delta < \Delta_{\text{макс}} \end{array} \right\}. \quad (2.81)$$

Когда параметрическое описание не ограничивается указанными параметрами, области (2.80) и (2.81) являются подмножествами областей (2.63) и (2.76):

$$E^* \subseteq E; G^* \subseteq G.$$

Выражение (2.77) с учётом (2.80)–(2.81) может быть записано с помощью системы неравенств:

$$\left\{ \begin{array}{l} f_6 \cdot n_3 \cdot R < N \\ k \cdot M_c < M_{\text{дв}} \\ 0 < \Delta(t) < \Delta_{\text{макс}} \end{array} \right. . \quad (2.82)$$

Каждое из неравенств (2.82) характеризует одно из предельных состояний, при этом функции надёжности (2.78) по каждому виду отказов можно представить в виде:

$$P_1(t) = P[N > f_6 \cdot n_3 \cdot R], \quad (2.83)$$

$$P_2(t) = P[M_{\text{дв}} > k \cdot M_c], \quad (2.84)$$

$$P_3(t) = P[0 < \Delta(t) < \Delta_{\text{макс}}]. \quad (2.85)$$

В случае независимости отказов (2.20), с учётом (2.83)–(2.85), полная надёжность равна

$$P = \prod_{i=1}^3 P_i, \quad (2.86)$$

что соответствует формуле (2.36).

Отсутствие в множестве G хотя бы одного элемента, для которого не обнаружено соответствия в подмножестве E (2.77), означает, что взаимное положение указанных множеств не определено и невозможно что-либо утверждать о вероятности пересечения этих множеств. Фактически мы имеем ситуацию, при которой, если хотя бы для одного элемента множества E область допустимых состояний не определена, то это соответствует состоянию неопределённости. Тогда решение задачи надёжности становится возможным только статистическими методами, например методом Монте-Карло.

Если исходить из высказывания А.И. Берга: «*В проблеме надёжности нет важных и неважных вещей. Не всё ли равно, из-за чего остановится блюминг, мартен или доменная печь?*» [54], то для практического применения рассматриваемой обобщённой модели надёжности области E и G должны быть определены без разделения по критерию «важность–неважность» составляющих их элементов, которые, в свою очередь, должны быть попарно соотнесены друг с другом по аналогии с системой неравенств (2.82). В этом случае область возможных состояний E необходимо определять в виде критериев выполнения требуемых функций, которые могут быть установлены, например, заданием для каждой функции набора параметров, характеризующих способность её выполнения, а область работоспособных состояний G необходимо задавать допустимыми пределами изменения значений этих параметров [83]. Фактически данная процедура строго соответствует терминологическому определению работоспособного состояния в параметрическом виде [82].

Определение в явном виде всех локальных и обобщённых параметров, определяющих полную надёжность МУ ОС, является одной из главных задач проведения анализов надёжности. При этом важно различать и пользоваться понятиями проектной (желаемой) надёжности (2.33), на чём базируется метод расчёта надёжности механических частей конструкции летательного аппарата А.А. Кузнецова, и полной (фактической) надёжности (2.36), которую можно определить на основе обобщённой параметрической модели надёжности согласно (2.63)–(2.86). Это обуславливается различием решаемых задач при проектировании, когда изделие представляет **проектная конструкторская документация** (ПКД) в виде совокупности взаимоувязанных параметров, и при конструировании, когда проектные решения реализуются в **рабочую конструкторскую документацию** (РКД) путём установления необходимых и достаточных требований к изготовлению.

ГЛАВА 3

ПОДХОД К РАЗРАБОТКЕ МЕТОДА АНАЛИЗА НАДЁЖНОСТИ С УЧЁТОМ КОНСТРУКТОРСКИХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ

3.1. Причины отказов механических устройств одноразового срабатывания

Анализы надёжности МУ ОС на основе оценки проектной надёжности P_{Π} (2.33) являются эффективными для относительно простых конструктивных исполнений механизмов раскрытия и фиксации при условии, что они не содержат сколь-нибудь серьёзных конструкторских ошибок и производственных дефектов или к ним не предъявляют повышенные требования надёжности. При разработке и создании высоконадёжных МУ ОС крупногабаритных РК, состоящих из взаимосвязанных между собой элементов, число которых может достигать нескольких тысяч [114], сложно избежать конструкторских, технологических и производственных ошибок, поэтому анализы надёжности необходимо проводить с учётом возможных отклонений от идеального (ожидаемого) состояния конструкции согласно (2.36).

Достоверность расчётов надёжности определяется степенью соответствия принятых в расчётных схемах допущений с фактически применёнными в конструкции конструкторскими и технологическими решениями. Это приводит к необходимости как минимум подтверждения соответствия фактического состояния конструкции и её ожидаемого состояния согласно установленным в КД и ТД требованиям на изготовление.

Предположим, что необходимо выполнить расчёт надёжности срабатывания держателя, показанного на рис. 3.1 [60].

В стартовом положении держатель препятствует подвижности элемента (7), принадлежащего поворотной конструкции. Держатель состоит из кривошипа (1), шарнира опорного основания (2), шарнира шатуна (3), шатуна (4), шарнира колодки (5), колодки (6), шарнира опорного основания колодки (8), рычагов (9), пружины раскрытия (10) и тросовой тяги (11), связанной с пироустройством (на рис. 3.1 не показано). При срабатывании пироустройства происходит ослабление натяжения тросовой тяги (11), что приводит к нарушению равновесия рычагов (9). Под действием пружины (10) рычаги (9) вместе с кривошипом (1) поворачиваются в своё

крайнее положение до упора (на рис. 3.1 не показан), увлекая за собой шатун (4) и колодку (6). В результате указанного поворота колодки (6) удерживаемый элемент (7) высвобождается для перемещения в направлении Б.

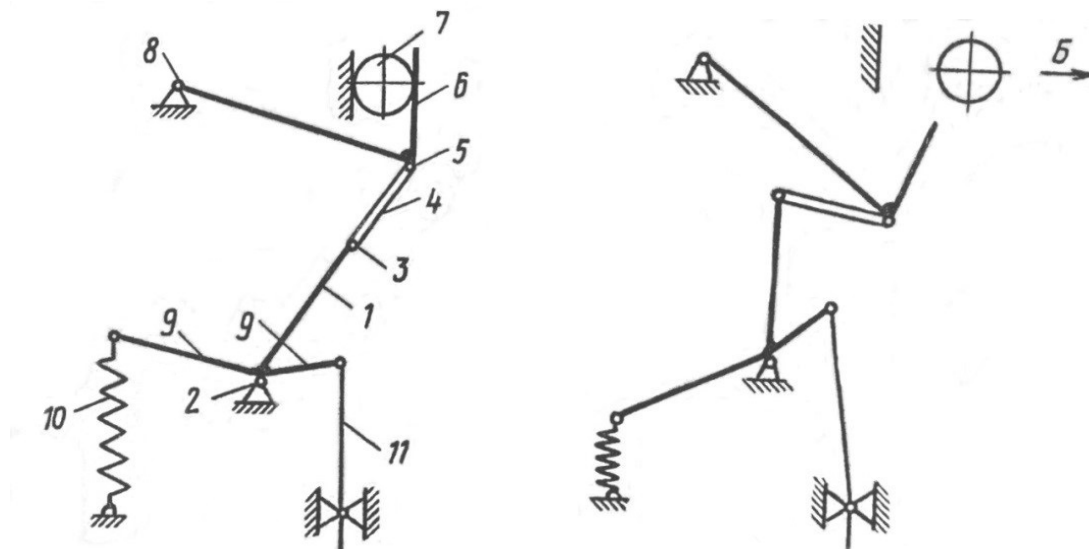


Рис. 3.1. Схема удержания и срабатывания держателя

Допустим, что в результате расчёта надёжности держателя с учётом обеспечения условий его работоспособности по прочности и по функционированию при срабатывании (раскрытии) согласно формуле (2.11) показатель ВБР удовлетворяет заданным требованиям. Тем не менее, исходя из формулы (2.36), это не является гарантией того, что держатель при срабатывании не откажет по какой-либо иной причине.

Невыполнение требований КД и ТД при изготовлении держателя может существенно снизить точность расчёта надёжности по проектным параметрам (2.33). Для рассматриваемого держателя в технической документации должны быть предусмотрены, выполнены и проконтролированы следующие условия его конструктивного исполнения:

1) в стартовом положении держателя между линией, проходящей через оси (2) и (5), и осью (3) (рис. 3.1) должен быть предусмотрен эксцентриситет в направлении срабатывания держателя. На практике значение эксцентриситета выбирают не ниже точности измерительного инструмента для его однозначного определения при техническом контроле. В противном случае механизм держателя может оказаться в «мёртвом положении», для преодоления которого не хватит усилия пружины (10) (в «мёртвом положении» оси (2), (3) и (5) расположены на одной линии);

2) после проведения проверок функционирования на этапах ПСИ и НЭО при зачековке держателя заданный эксцентриситет в подкосном механизме между кривошипом (1) и шатуном (4) не должен изменяться;

3) на поверхность вращения одной из деталей в каждом из шарниров должен быть нанесён разделительный слой ТСП, предотвращающий холодную сварку в вакууме, а также обеспечивающий требуемый ресурс срабатываний держателя без ухудшения антифрикционных характеристик при наземных испытаниях (требуемую износостойкость) и предсказуемый (стабильный) коэффициент трения в условиях целевого использования;

4) во всех шарнирах должен быть предусмотрен гарантированный радиальный зазор с учётом полей допусков на геометрические размеры сопряженных деталей, предельно возможных тепловых деформаций конструкции держателя и максимальной толщины слоя ТСП в зазоре при возможных её изменениях в процессе эксплуатации (2.59);

5) между колодкой (6) и элементом (7) закрепляемой конструкции должен быть обеспечен минимальный технологический зазор либо фиксированное усилие поджатия (натяг), т. е. обеспечено строго определённое условие начального страгивания;

б) для обеспечения начального страгивания поворотной конструкции должен быть предусмотрен пружинный толкатель (на рис. 3.1 не показан), действующий в направлении Б (направление раскрытия конструкции в рабочее положение);

7) ход пружинного толкателя обеспечивает сопровождение элемента закрепляемой конструкции (7) до полного выхода из зоны возможного соприкосновения с колодкой (6);

8) для обеспечения стабильности значений моментов движущих сил упругая деформация мест крепления пружины раскрытия (10) не должна превышать установленного предела;

9) для минимизации усилия протяжки троса (11) в оболочке Боудена необходимо предусмотреть антифрикционное покрытие троса, оптимальное соотношение наружного диаметра троса и внутреннего диаметра боуденовской оболочки, а также максимально возможные радиусы перегибов при прокладке трассы тросовых тяг;

10) для обеспечения необходимых (с точки зрения функционирования) зазоров в держателе и стабильности натяжения тросовых тяг нужно предусмотреть устройства, регулирующие их натяжения («талрепы» на рис. 3.1 не показаны).

Невыполнение хотя бы одного из приведённых выше условий может привести к отказу держателя, несмотря на положительные в целом результаты расчёта надёжности по формуле (2.11). Например, невыполнение условия по обеспечению требуемого эксцентриситета подкосного механизма в одном из четырех замков СО привело к гибели КА «Канопус-СТ» в 2015 г. (см. табл. 2.1).

Все условия конструктивного исполнения держателя регламентируются требованиями в КД и ТД, а результаты вычисления ВБР должны быть обусловлены строгим выполнением соответствующих конструкторских и технологических требований, направленных на достижение безотказной работы держателя. Только в обязательности и последовательности исполнения конструкторских и технологических решений по обеспечению безотказности кроется ответ на вопрос, какими именно конкретными действиями следует добиваться заданной надёжности и как исключить или, по крайней мере, максимально снизить вероятность возникновения отказов. Для обеспечения заданной надёжности требуется проводить экспертные оценки как исходных данных, так и результатов расчётов на соответствие их физическому и здравому смыслу, поскольку никакая методика количественной оценки надёжности не способна сама по себе обеспечить требуемую надёжность. По образному высказыванию руководителя по безопасности и надёжности космической программы «Space Shuttle» Charles Harlan: *«Все методы оценки надёжности требуют экспертных оценок специалистов. Когда мы подходим к этому, значения вероятностей во многом напоминают бирку, которую инженер навешивает на какую-то конструкцию, чтобы показать, что он думает про её надёжность»* [115].

На необходимость учёта технологических факторов при обеспечении надёжности было «отдельной строкой» указано в работе Н.А. Тестоедова [116], но до сих пор оценка их влияния на надёжность не нашла должного места в развитии методов анализа надёжности. Между тем неудачи последних лет в космосе нередко происходили из-за причин технологического и производственного характера. Например, исходя из заявления представителя совместной комиссии Sea Launch AG и SS/L, причиной нераскрытия одной из панелей БС на КА «Intelsat 19» стало *«редкое сочетание производственных факторов в ходе изготовления БС в компании-производителе КА, приведшее к структурным и электрическим повреждениям компонентов батареи»* [117], нераскрытие навигационной антенны на транспортном грузовом корабле «Прогресс М-19М» произошло из-за *«попадания клея в механизм раскрытия»* в процессе проведения сборочных работ [118], а неполное раскрытие крыла БС на КА «Ресурс-П» № 3 – из-за *«нарушения механической связи крепления пакета створки солнечной батареи, в результате чего произошло его преждевременное раскрытие и зацепление за конструкцию космического аппарата»*, что по заявлению пресс-службы Роскосмоса случилось *«вследствие нештатных воздействий на механизм раскрытия или из-за особенностей проведения операции сборки данного механизма... и контроля этой операции»* [119] (см. табл. 2.1).

Как показывает практика, технологическая надёжность определяется не столько факторами, которые могут быть учтены при проектных расчётах надёжности, сколько различного рода отступлениями от требований рабочих чертежей при изготовлении либо отсутствием в чертежах указаний по выполнению параметров, влияющих на надёжность. Технологические факторы при создании ЛА являются причинами от 15 до 30 % отказов [14]. Характерный пример отказов, связанных с нарушением технологической дисциплины, приведён в работе [34], где говорится о том, что *«некоторые исполнители, много лет выполнявшие одну и ту же работу, стали работать без чертежей, “по памяти”, и делали брак, который контролёры также не замечали, так как тоже контролировали выполнение работ без чертежей, “по памяти”»*. Здесь также следует упомянуть отказы, происходящие в результате заводского брака, т. е. отклонения от заданных параметров и характеристик при правильной ТД или при наличии скрытых дефектов, не выявленных в процессе заводского контроля [120].

Необходимость учёта конструкторских и технологических факторов подтверждается результатами исследований [121], проведённых Rome Air Development Center с целью совершенствования стандарта по обеспечению надёжности Министерства обороны США MIL-HDBK-217. Были проанализированы сведения об авариях и инцидентах на 300 американских и европейских КА, касающиеся 2 500 фактов отказов за период с начала 1960 по январь 1984 г. для трёх типов подсистем: электронных, электромеханических и механических. Результаты анализа отказов указанных подсистем приведены в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Причины отказов подсистем КА

Причины отказов	Электронные подсистемы, %	Электромеханические подсистемы, %	Механические подсистемы, %
Конструирование (Design)	22,0	22,3	34,4
Факторы среды (ENVMT)	20,7	19,5	25,3
Комплекующие (Part)	14,5	17,1	10,8
Качество (Quality)	6,7	8,1	8,9
Эксплуатация (Oper)	2,6	6,5	6,9
Другие (Other)	7,0	7,7	2,2
Неизвестные (Unknown)	26,5	18,8	11,5

Если ошибки конструирования (Design) и недооценку конструкторами условий внешней среды (Environmental, ENVMT) рассматривать как конструкторские ошибки, то от 63,9 до 79,4 % случаев отказов предопределяются ещё до начала эксплуатации МУ ОС – «за кульманом» и в производственных цехах (что-то недодумали и не учли, где-то ошиблись, допус-

тили брак, не проконтролировали и т. п.). Различия в причинах отказов для названных подсистем могут быть незначительными, если учесть, что на механические подсистемы приходится максимальная доля отказов по конструкторским и технологическим причинам (79,4 % случаев) при минимальной доле причин неизвестного характера (11,5 % случаев), а на электронные подсистемы – минимальная доля отказов по конструкторским и технологическим причинам (63,9 % случаев) при максимальной доле неизвестных причин (26,5 % случаев).

Похожее соотношение причин конструкторских и технологических отказов следует из статистики отказов электронных схем отечественных КА, которые приведены в табл. 3.2 [122].

Таблица 3.2

Причины отказов электронных схем КА

Причины отказов	Процент общего числа отказов, %
Дефекты конструкции и внешнего вида	60
Дефекты оксидирования и фотолитографии	16
Обрывы внутриэлементных электрических соединений	7
Коррозия металлов	5
Механические повреждения	4
Выход параметров за нормы ТУ	3

Известно, что в процессе наземных и лётных испытаний отказы вооружения, военной и специальной техники по причине конструкторских и технологических недоработок составляют соответственно 30...40 % и 35...45 % от их общего количества [120].

Общемировой опыт показывает, что в целом по промышленности порядка 80 % всех дефектов, которые выявляются в процессе производства и эксплуатации изделий, связаны с недостаточным качеством процессов конструирования и подготовки производства. Около 60 % всех сбоев, возникающих при эксплуатации во время гарантийного срока изделия, имеют свою причину в ошибочной, поспешной и несовершенной разработке [123]. При этом до 80–85 % затрат в машиностроении предопределяются техническими решениями, которые формируются в процессе конструирования и разработки технологии [124].

Таким образом, в основе обеспечения надёжности любых технических объектов прежде всего лежат конкретные конструкторские и технологические решения, а значит и задача анализов надёжности в этом случае должна сводиться к оценке эффективности таких решений с учётом требований, предъявляемых к надёжности. Следствием необходимости учёта конструкторских и технологических решений при расчётах надёжности

является отход от методологии современной теории надёжности, основанной на презумпции наличия ошибок в готовом изделии и соответственно нацеленности на применение мер по смягчению их последствий путём использования различных видов резервирования вместо поиска и исключения реальных причин возникновения отказов [125].

Согласно теории надёжности при количественном оценивании надёжности предполагается, что механизм функционирования реального технического объекта в части проявлений отказов подчиняется определённым математическим моделям, подходящим для описания анализируемой реальности. Наибольшее распространение в теории надёжности получили вероятностные и вероятностно-статистические модели поведения объектов. В первом случае математическая модель имитирует механизм функционирования реальной системы стохастической природы на основе гипотетической закономерности в её поведении. Во втором случае математическая модель имитирует механизм функционирования конкретной системы на основе значений отдельных параметров, которые оцениваются по результатам предварительных статистических наблюдений (своего рода настройки гипотетических закономерностей на реальную действительность с использованием для этого накопленной статистической информации) [126].

Вероятностная модель отражает абстрактную оценку теоретических шансов реализации событий на основе заранее заданной закономерности в поведении реальных систем, а вероятностно-статистическая модель даёт приблизительную оценку теоретических шансов проявления частоты отказов системы на основе предварительно накопленной статистической информации. В любом случае при расчётах оцениваются не конкретные технические решения, заложенные и реализованные в реальном изделии, а вероятностное поведение расчётной модели изделия, когда предполагается, что к началу наработки его работоспособность обеспечена.

Между тем хорошо известно, что причинами отказов, приводящих к серьёзным авариям и катастрофам, нередко становятся не концептуальные просчёты, а отказы «грошовых» элементов конструкций. Например, неисправность болта рулевого управления ценой 4¢ послужила причиной крушения «Боинга 707» стоимостью \$1 млн в парижском аэропорту 03.07.1962 [127], а отсутствие обыкновенной шайбы в узле крепления ограничителя предкрылка привело 20.08.2007 к пожару, в результате которого в аэропорту города Наха (Япония) был полностью уничтожен авиалайнер «Боинг 737-800» с базовой стоимостью \$57,5 млн [128]. Однако методы современной теории надёжности не позволяют прогнозировать возникновение подобного рода отказов конструктивных элементов.

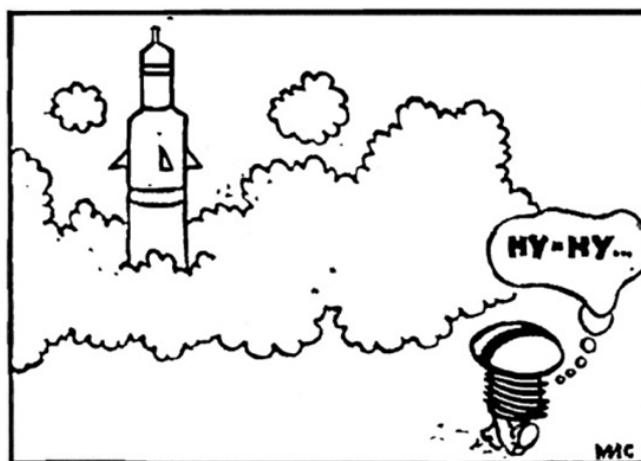


Рис. 3.2. Вот так наглядно и не без чёрного юмора художник подметил цену «грошового» отказа

В результате для сложной техники весьма актуальна трагикомическая ситуация, показанная на рис. 3.2.

3.2. Краткий обзор концепций причин возникновения отказов

На практике не всегда возможно обеспечить заданную надёжность изделия за счёт резервирования, например, когда нет возможности «конструкторскими методами» избежать появления ТЕО (элементов, в конструкции которых не предусматривается резервирования). Примерами такого рода элементов в конструкции механических устройств являются шарниры и замки зачекочки, дублирование которых физически невозможно, или раскрывающие приводы поворотных конструкций, которые в принципе можно дублировать, но это недопустимо исходя из ограничений по массе или по габаритам шарниров. В таких случаях конструирование должно осуществляться на основе принятия конструктором технических решений, эффективность которых зависит от следования тем из концепций надёжности, которые с максимальной эффективностью определяют выбор конструктивных принципов и стратегию действий конструктора при разработке КД.

На сегодняшний день существует две концепции теории надёжности, которые основаны на представлениях о том, что отказы обусловлены стохастическими либо детерминированными событиями:

- концепция случайности причин возникновения отказов и их неизбежности;
- концепция физических основ причин возникновения отказов и возможности их прогнозирования.

Случайное событие при определённых условиях может произойти или не произойти. Наступление или ненаступление случайного события не требует знаний причинно-следственных связей с предшествующими событиями, но поскольку такая связь объективно существует независимо от наших знаний, то она характеризуется вероятностью как абстрактной мерой взаимосвязей причин возникновения событий. Вероятность наступления случайного события не может быть равна единице, поскольку в основе любых методов исследования вероятностных явлений лежит накопленный опыт наблюдений, заведомо ограниченный условиями их проведения.

Детерминированное событие при заданных условиях непременно должно произойти, поскольку оно предопределено причинно-следственной связью с предшествующими событиями фундаментальными законами физики. Наступление детерминированного события предполагает, что существует принципиальная возможность пошагово восстановить предшествующие события, которые его определили. Вероятность наступления детерминированного события обусловлена конкретными обстоятельствами действительности и однозначно предсказуема в рамках знания о них, а потому может быть равна единице в случае осуществления достоверных событий. Это означает, что если существуют предпосылки для возникновения отказов, которые не противоречат законам природы, то отказы рано или поздно произойдут. Взгляд на детерминированность или случайность событий определяется уровнем понимания и полнотой знаний конструктором причинно-следственных связей физических процессов, происходящих в исследуемом объекте при эксплуатации.

Концепция случайности причин возникновения отказов и их неизбежности основана на абстрагировании от физических законов, приводящих к нарушению работоспособного состояния объектов. Она широко применяется для обеспечения надёжности электронных, радиоэлектронных, электротехнических и электрорадиотехнических устройств, а также для сложных технических систем на их основе. Характерными особенностями указанных технических объектов являются:

- доступность получения статистических параметров случайных событий и процессов;
- наличие множества однотипных элементов в различных по назначению устройствах;
- возможность разработки сложных структурных схем для обеспечения высокого уровня надёжности;
- широкие возможности по резервированию элементов, главным образом структурному резервированию;
- относительная простота замены отказавших элементов и т. п.

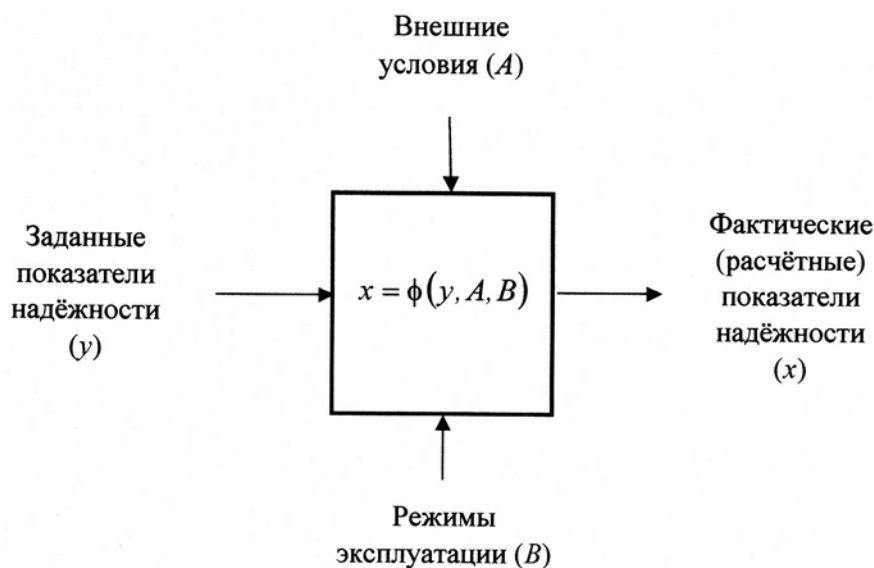


Рис. 3.3. Информационная модель надёжности типа «чёрный ящик»

Из-за множества неочевидных физических процессов, происходящих внутри таких устройств, их надёжность исследуют с помощью модели на основе чёрного ящика. В общем виде модель надёжности типа «чёрный ящик» показана на рис. 3.3.

Вход чёрного ящика определяют заданные параметры надёжности, а выход – фактические (расчётные) показатели надёжности с учётом заданных внешних условий и режимов эксплуатации. Заведомо предполагается, что существует взаимосвязь между входными и выходными параметрами исследуемого устройства, которую можно выразить с помощью оператора связи ϕ в виде функций, дифференциальных уравнений и подобных зависимостей. Преобразование входов и выходов внутри чёрного ящика является процессом обеспечения надёжности, при этом исследуются не свойства и отношения СЧ внутри устройства, а реакция самого устройства (как целого) на изменяющиеся внешние условия и режимы эксплуатации, которую можно описать с помощью оператора связи:

$$x = \phi(y, A, B).$$

Обеспечение надёжности в случае использования концепции случайности причин возникновения отказов и их неизбежности строится на следующих аппаратно-инструментальных методах теории надёжности:

- математических, основанных на определении математических закономерностей, которым подчиняются отказы, а также на разработке методов количественного измерения надёжности и инженерных расчётов показателей надёжности;
- статистических, основанных на обработке статистических характеристик надёжности и закономерностей отказов.

Основным источником информации о надёжности технических систем, подчиняющихся концепции случайности причин отказов, служит статистика отказов, дающая представление о том, насколько желаемые показатели надёжности обеспечены существующими методами их разработки, изготовления и эксплуатации.

Теоретической базой концепции случайности причин возникновения отказов и их неизбежности являются теория вероятностей, математическая статистика, теории случайных процессов, массового обслуживания, математическое моделирование и другие разделы математики. Библиографические обзоры отечественных и зарубежных публикаций (раскрывающие математические и статистические методы теории надёжности) проведены И.А. Ушаковым [4; 129], В.Л. Шпером [130–132], И.В. Апполоновым [133] и охватывают все сколько-нибудь значимые работы за период 1939–2007 гг.

Концепция физических основ причин возникновения отказов и возможности их прогнозирования строится на изучении физики отказов (вследствие износа, усталости, коррозии, старения, разрушений, деформаций, тепловых и трибологических эффектов и пр.), расчётно-экспериментальном обосновании выбранных параметров конструкций, а также на конструкторских и технологических приёмах создания технических объектов. Типичными примерами обеспечения надёжности на основе физических причин возникновения отказов могут служить изделия машиностроения, изготовленные с помощью механообрабатывающих, механосборочных и сборочно-сварочных технологий. Обеспечивать требуемый уровень надёжности таких технических объектов можно на базе изучения физических основ причин возникновения отказов, использования методов прогнозирования возможного поведения технических объектов в предполагаемых условиях эксплуатации, применения приёмов конструкторского и технологического обеспечения заданных показателей качества, проведения специальных испытаний и регламентирования условий эксплуатации.

Теоретической базой концепции физических основ причин возникновения отказов являются естественные науки, изучающие различные аспекты разрушения, старения и изменения свойств материалов: теория упругости, пластичности и ползучести, теория усталостной прочности, механика разрушения, трибология, физико-химическая механика материалов и др.

Идея концепции физических основ причин возникновения отказов направлена не на анализ надёжности отслуживших свой срок объектов, который не даёт инженерных идей, а на прогноз обеспечения надёжности будущих объектов и поиск ответов, какими именно способами следует добиваться требуемой надёжности. По высказыванию А.С. Проникова, *«проблема надёжности связана в первую очередь именно с прогнозом, так как констатация того или иного уровня надёжности для машины, уже отра-*

ботавшей свой ресурс, имеет весьма малую ценность. Особенно на ранних стадиях создания машины – при её проектировании или при наличии опытного образца – необходимо дать оценку её надёжности в предполагаемых условиях эксплуатации» [13].

Перечень работ, раскрывающих сущность физических основ надёжности, не столь велик по сравнению с перечнем публикаций, в которых приведены математические и статистические методы теории надёжности, отчасти потому, что основы физической надёжности были сформулированы только в 70-е гг. XX в. [12; 13; 134–139].

Отражением в НТД равной значимости обеих концепций теории надёжности является двойственное толкование термина «надёжность», приведённое в ГОСТ 27.002–89 [82]. Основное определение, именуемое параметрическим [140], трактует надёжность как *«свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования»* (здесь и далее *«применение, техническое обслуживание, хранение и транспортирование»* понимается как эксплуатация, согласно определению и разъяснению этого термина в ГОСТ 25866 [141]).

Альтернативное определение, приведённое в справочном приложении и получившее название функционального [140], трактует надёжность как *свойство объекта сохранять во времени способность к выполнению требуемых функций в заданных режимах и условиях эксплуатации, которое рекомендуется применять тогда, когда параметрическое описание нецелесообразно (например, для простейших объектов, работоспособность которых, характеризуется по типу «да–нет») или невозможно (например для систем «машина-оператор», т. е. таких систем, не все свойства которых могут быть характеризованы количественно).*

В новой редакции стандарта ГОСТ 27.002–2015 [83] альтернативное и основное определения надёжности переставлены местами. Никаких подсказок для решения проблем надёжности МУ ОС эта перестановка не даёт, даже с учётом разъяснения в обновлённом стандарте понятия «требуемые функции», которые *«устанавливают в нормативной, конструкторской, проектной, контрактной и иной документации на объект»* [83].

Между тем обе концепции теории надёжности есть часть единого цельного научного представления о надёжности, которые призваны дополнять друг друга. Отказ изделия – явление случайное, но причины, обуславливающие возникновение отказов, связаны с определёнными физическими и физико-химическими процессами, происходящими в материалах и конструкциях на разных этапах их ЖЦ. Механизмы отказов могут быть представлены либо непрерывными функциями времени, которые обычно ха-

рактически характеризуют процессы старения и износа, либо скачкообразными функциями, отражающими наличие множества невыявленных дефектов или качественно слабых мест [113]. Следование той или иной концепции надёжности основано на разного рода математических вычислениях, тем не менее, математика в арсенале конструктора, по словам Б.В. Гнеденко, «является лишь средством исследования и расчёта, но не самоцелью. Во главе всегда должна быть инженерная проблема, и для её решения должен привлекаться тот научный аппарат, который ближе всего соответствует природе изучаемого явления» [142].

3.3. Пример совместного использования концепций причин возникновения отказов при конструировании

МУ ОС структурно, конструктивно и функционально состоят из элементов, отказы которых порознь или одновременно могут подчиняться концепциям неизбежности отказов и возможности их прогнозирования. Например, функционирование БРУ на базе пиросредств основано на последовательном срабатывании электротехнических, пиротехнических и механических устройств, конечная цель которых – преобразование командных электрических сигналов в совершение работы по направленному механическому перемещению элементов конструкции.

Принцип работы пиротехнических устройств иллюстрируется на примере реализации устройства блокировки и освобождения элементов раскрывающегося типа [143], показанного на рис. 3.4.

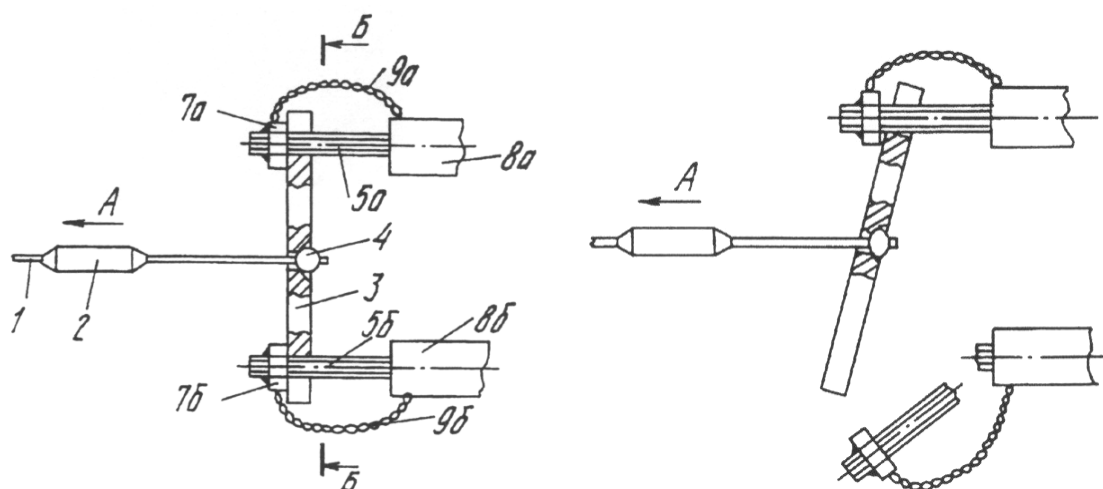


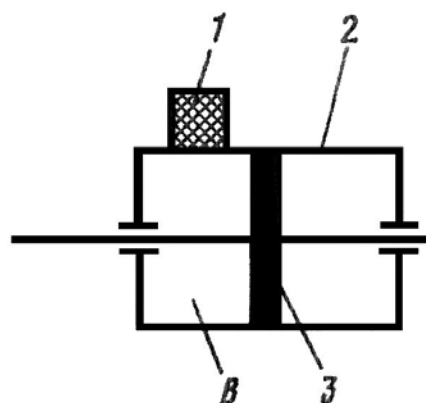
Рис. 3.4. Устройство освобождения и блокировки в стартовом положении и после срабатывания пиротехнических устройств

Устройство содержит по меньшей мере один трос (1), удерживающий РК от раскрытия. Натяжение троса осуществляется при помощи муфты (2). Рычаг (3) шарнирно соединён с тросом при помощи шарика (4), который обжат на конце троса. Шпильки (5а) и (5б) заведены в прорези рычага (3), расположенные по контуру. Точка приложения троса (1) находится посередине рычага (3) между прорезями. Гайки (7а) и (7б) ограничивают перемещение рычага (3) по направлению натяжения троса (1) (направление А). Гайки соединены со шпильками и застопорены. Каждая шпилька (5а) и (5б) соединена с пиротехническими устройствами (8а) и (8б).

По команде от БКУ пиротехнические устройства (8а) и (8б) разрушают шпильки (5а) и (5б), в результате чего трос (1) теряет связь с рычагом (3) и, ослабляясь, перемещается в направлении А, снимая тем самым кинематические ограничения с закрепляемой конструкцией, например с тросовой системой натяжения держателя, показанного на рис. 3.1.

Подробные описания различных конструктивных исполнений и принципов функционирования пиротехнических устройств (пирочек, пирозамков, пиножей), используемых в качестве актуаторов БРУ, приведены в работах [15; 33; 122]. Принципиальная схема пиротехнического устройства показана на рис. 3.5.

Рис. 3.5. Принципиальная схема пиротехнического устройства: 1 – пиропатрон; 2 – корпус; 3 – поршень; В – рабочая полость для выхода пороховых газов



Срабатывание пиротехнического устройства осуществляется за счёт определённой последовательности событий:

- подача электрического тока на электрозапал пиропатрона (1);
- воспламенение и подрыв порохового заряда пиропатрона (1) в рабочую полость В корпуса (2);
- перемещение поршня (3) в корпусе (2);
- работа пороховых газов по перемещению поршня (3), приводящая к механическому разрушению (срезу) чек (фиксаторов, стопоров), в рассматриваемом выше примере устройства блокировки и освобождения элементов, – шпилек (5а) и (5б) (рис. 3.4).

Схема функционирования БРУ на базе пиротехнических устройств показана на рис. 3.6. Блоками C_1 , C_2 и C_3 на рис. 3.6 отмечены события, которые могут произойти или не произойти в результате срабатывания БРУ. Событие C_1 заключается в формировании и передаче командного электрического сигнала к инициатору срабатывания БРУ (электрозапалу). Событие C_2 заключается в подрыве пиропатронов от электрозапала, обеспечивающего практически мгновенное приведение в действие механических частей БРУ (перемещению поршня). Событие C_3 – это физическое разрушение пороховыми газами от пиропатронов механических фиксаторов (чек), дающих возможность зачекованной системе перейти в состояние геометрически изменяемой системы, что является необходимым условием срабатывания БРУ в целом.

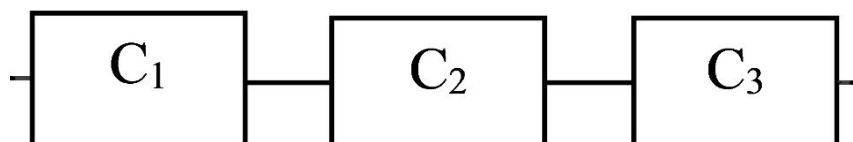


Рис. 3.6. Блок-схема функционирования БРУ

Отказы при совершении событий C_1 и C_2 подчиняются концепции случайности и неизбежности отказов вследствие неконтролируемости физических процессов, происходящих внутри исполнительных элементов (подача электрического тока, нагрев электрозапала до температуры воспламенения порохового заряда, подрыв порохового заряда, создание заданного давления пороховых газов в рабочей полости пиротехнического устройства). Количественной мерой оценки таких отказов служит вероятность совершения события. Обеспечение надёжности совершения события C_1 осуществляется функциональным резервированием (дублированием команды на подачу электрического сигнала от бортового и наземного комплекса управления). Обеспечение надёжности реализации события C_2 достигается статистическими методами отработки срабатывания пиропатронов с использованием структурного резервирования (дублирования пиропатронов). Надёжность в случае применения резервирования определяется формулой

$$P_{\text{рез}} = 1 - (1 - P_N^*)^{m+1},$$

где P_N^* – экспериментальная (ступенчатая) функция наработки (2.4); m – кратность резервирования.

Отказы при реализации события C_3 подчиняются концепции физических основ причин возникновения отказов и возможности их управлением,

поскольку связаны с контролируемой потерей конструкционной прочности фиксаторов (чек). Количественной мерой оценки таких отказов служит вероятность разрушения фиксаторов при срабатывании пиропатрона, которая определяется зависимостью

$$N_{\text{доп}} < N_{\text{дейст}},$$

где $N_{\text{доп}}$ – допустимая несущая нагрузка на фиксатор; $N_{\text{дейст}}$ – нагрузка пороховых газов в пиропатроне, действующая на фиксатор [144].

Надёжность срабатывания механических компонентов БРУ определяется вероятностью соблюдения неравенства

$$P = P(N_{\text{доп}} < N_{\text{дейст}}).$$

Обеспечение надёжности совершения события C_3 достигается расчётными и экспериментальными методами сопротивления материалов. При совершении событий C_1 и C_2 подразумевается и допускается возможность отказов, по крайней мере одного из дублирующих элементов, поскольку способы повлиять на степень вероятности их осуществления (в каждом) на уровне физических процессов невелики и неочевидны.

При совершении события C_3 возможность отказов не допускается, при этом надёжность выполнения функций можно выразить вероятностью разрушения фиксаторов чек. Степень вероятности их разрушения в заданных условиях и режимах эксплуатации можно регулировать за счёт варьирования физико-механических характеристик материала фиксаторов и их геометрических размеров так, чтобы обеспечить выполнение требуемых функций по разрушению фиксаторов при строго определённой нагрузке.

Применение параметрического определения термина «надёжность» [140] при выполнении событий C_1 и C_2 обнаруживает отсутствие каких-либо физических параметров, которые могли бы характеризовать способность выполнять требуемые функции. Вероятность в данном случае – это не более чем характеристика состояния элементов, которая может проявиться, а может и нет, чтобы в них не происходило на физическом уровне.

Применение функционального определения термина «надёжность» [140] ограничивает возможности обеспечения надёжности при выполнении события C_3 . Поскольку в функциональном определении термина речь идёт о выполнении требуемых функций, то по умолчанию подразумевается отражение относительной частоты в серии наблюдений случайных событий, которое выражается действительным числом в интервале от 0 до 1. Это переносит фокус внимания на вероятностно-статистическую природу надёжности разрушения фиксатора, оставляя в стороне ключ к возможности регулирования надёжности физическими методами.

Совместное применение концепций случайности причин возникновения отказов и их физических основ позволяет конструктору принимать эффективные и рациональные решения при разработке КД.

3.4. Специфика решения задачи надёжности раскрытия механических устройств одноразового срабатывания

Если при срабатывании МУ ОС в формуле (2.1) за суммарную наработку, при которой исчисляется безотказность, принять время одного цикла срабатывания по служебному назначению t (на рис. 1.2 – это интервал t_2-t_5 с учётом сохраняемости в течение времени t_1), то с формальных позиций в каждом конкретном случае раскрытия в космическом пространстве вероятность должна быть либо 1 (безотказное раскрытие), либо 0 (нераскрытие – отказ как результат нарушения работоспособного состояния). Градация вероятностей раскрытия в интервале от 0 до 1 не имеет смысла (любой отказ по определению является критическим), поскольку всегда ухудшается работа иерархической системы высшего порядка – КА, вплоть до полной его гибели.

Если исходить из того, что результатом раскрытия МУ ОС может быть только два исхода: «раскрытие» и «нераскрытие», то не существует никакого смысла рассматривать заданную ВБР, например равную 0,999 5, как допустимость пяти нераскрытий на 10 000 попыток. В каждом конкретном случае раскрытие может произойти или не произойти и зависит это от способности изделия проявить или не проявить свойство безотказности, как объективную меру возможности наступления желаемого события.

Полным аналогом в этом случае выступает способность изделия проявлять заданное свойство прочности, которое не зависит от кратности воспроизведения событий. Соответственно, и подход к обеспечению безотказности раскрытия с вероятностью 1 должен быть точно таким же, как для обеспечения прочности с запасом 1, т. е. для заданных условий и режимов эксплуатации необходимо выбрать такие параметры конструкции будущего РК, чтобы обеспечить раскрытие с вероятностью 1.

Очевидно, что смысл установления в техническом задании на разработку МУ ОС требования по безотказности, например, 0,999 5, не может иметь цель верификации указанной цифры надёжности статистическими методами, поскольку исходя из теории вероятностей для её экспериментального подтверждения с доверительной вероятностью 0,9 необходимо провести не менее 4 605 независимых однородных испытаний [145]. С по-

зиций экономики и здравого смысла проведение такого объёма статистических испытаний абсурдно, поскольку для подтверждения заданного показателя ВБР всего лишь одного штатного раскрытия РК на орбите необходимо провести соответствующее число испытаний на раскрытие однородных образцов в космосе или в условиях имитации ФКП. Единственным разумным требованием в этом случае должно стать гарантированное раскрытие МУ ОС, ведь никто же не задаёт требований в ТЗ по конструкционной прочности с запасом меньше 1 (всем очевидно, что прочность должна быть обеспечена). Для гарантированного раскрытия требуется принятие и реализация таких конструкторских решений, которые бы привели к безусловному выполнению заданных функций.

3.5. Применение байесовских методов к конструированию безотказных изделий

Поскольку конструкторская разработка любого изделия производится людьми, а людям свойственно совершать ошибки [94], то деятельность по разработке КД можно рассматривать как модель принятия и реализации конструкторских решений на основе логических рассуждений в условиях неопределенностей. Представляется очевидным, что изготовление любого изделия без чертежа скорее всего окажется «неорганизованной активностью» [146]. Однако и изготовление изделия в строгом соответствии с чертежом не во всех случаях приводит к желаемому результату, если принятые конструкторские решения ошибочны.

Допустим, что любое решение в процессе разработки принимается конструктором только на основе уверенности в истинности своих суждений, а безотказность будущего изделия рассматривается как степень его уверенности в принятых решениях. В этом случае обеспечение безотказности можно представить с помощью байесовского подхода к надёжности на основе непрерывного преобразования априорных знаний в апостериорные (с учётом итерационного накопления и использования новых знаний) [147].

Знания являются следствием понимания законов устройства физического мира, а принятые конструктором технические решения – следствием этих знаний. Знания любого человека всегда ограничены. Любые необъяснимые события при наблюдениях трактуются как случайные, однако при обладании истинными знаниями все события оказываются строго детерминированными. Таким образом, единственным способом создания безотказных изделий будет непрерывное повышение уровня знаний конструктора и понимание принципов действия создаваемых им изделий [111], при-

чём степень понимания может изменяться на любом этапе их создания, по мере получения новых знаний и представлений об их работе.

Из всей совокупности знаний H о физическом устройстве мира у конструктора всегда существуют некие априорные знания $h \in H$ (в другой терминологии – причины или гипотезы) и соответствующие им основания для конструкторской деятельности, результаты которой могут характеризоваться степенью объективной случайности $P(h)$. На основании имеющихся знаний h конструктор принимает определённые технические решения D (в другой терминологии – следствия или утверждения), подерживающие знания с вероятностью, характеризующей степень уверенности в своих убеждениях $P(D)$, истинность которых определяется значением функции правдоподобия $P(D|h)$.

Принятие конструктором каких бы то ни было технических решений приводит к тому, что априорные гипотезы принимают вид апостериорных утверждений согласно теореме Байеса

$$P(h|D) = \frac{P(D|h) \cdot P(h)}{P(D)}. \quad (3.1)$$

Важно понимать, что D являются **конструкторскими решениями**, т. е. такими, которые принимает конструктор для реализации конкретного изделия. Совокупность конструкторских решений D – это часть **конструктивных решений** D_k , т. е. таких, которые относятся к конструкциям, известным неограниченному кругу лиц из НТД, технической литературы, справочников, типовых альбомов чертежей, патентных источников и т. п., причём

$$D \in D_k. \quad (3.2)$$

Очевидно, что в случае $h \subseteq H$ априорная вероятность $P(h) \rightarrow 1$. Это означает, что у конструктора существуют все основания принять такие конструкторские решения D из числа множества конструктивных решений D_k , которые могут быть охарактеризованы степенью уверенности в их истинности $P(D) \rightarrow 1$ со значением функции правдоподобия $P(D|h) \rightarrow 1$.

Предположим, что в процессе конструкторской подготовки конструкторская документация разработана в строгом соответствии с требованиями стандарта ЕСКД [148] по номенклатуре и видам документов. Формально это есть декларативное утверждение о том, что все требования к изготовлению предусмотрены, а конструктор уверен в принятых им решениях, т. е. $P(D) = 1$. Значит, исходя из формулы (3.1) возможны следующие варианты комбинаций априорной и апостериорной вероятностей:

- случай $P(h) = 1$, $P(h|D) < 1$ соответствует допущенным при разработке ошибкам конструктора, когда $P(D|h) < 1$. Ошибки конструктора

практически неизбежны, но их последствия могут быть сведены к минимуму или полностью устранены при наличии надлежащих методик анализов и проверок КД;

- случай $P(h) < 1$, $P(h|D) < 1$ показывает некомпетентность конструктора и отсутствие у него должных знаний, умений, навыков, опыта и т. п. Некомпетентность, пусть и не всегда, но можно устранить в результате проведения надлежащих видов и объёмов испытаний и экспериментов при проведении НЭО, которую можно рассматривать в качестве своеобразного фильтра для устранения ошибок конструирования и производства. Сюда же относится эффект «чёрного лебедя» [149] – неожиданные трудно прогнозируемые события, которые в конечном счёте имеют рациональное объяснение, как если бы эти события были ожидаемыми. Эффект «чёрного лебедя» устранить сложно, поскольку для его выявления требуется проводить моделирование маловероятных и редких сочетаний состояний изделия в заданных условиях и режимах эксплуатации.

Предположим, что все технические решения конструктор принимает на основе знаний физической необходимости, истинность которых определяется непротиворечием физическим законам мира, однако такие знания всегда неполные либо из-за недостаточной изученности влияния ВВФ на свойства материалов и поведение конструкции, либо из-за нестационарности проявления внешних воздействий во времени и в пространстве. В этом случае для достижения наибольшей апостериорной вероятности $P(h|D)$ конструктор должен принимать технические решения D с учётом максимального объёма имеющихся у него знаний $h_{\text{макс}}$:

$$h_{\text{макс}} = \arg \max_{h \rightarrow H} P(h|D). \quad (3.3)$$

Поскольку в формуле (3.1) выражение $1/P(D)$ есть некоторая постоянная величина, не зависящая от знаний h , то апостериорную вероятность и функцию правдоподобия можно выразить через неслучайный оператор

$$P(h|D) = L(D|h).$$

Как следствие указанной гипотезы апостериорная вероятность пропорциональна априорной вероятности

$$P(h|D) \propto L(D|h) \cdot P(h). \quad (3.4)$$

Зависимость (3.4) показывает, что если существует возможность принятия таких конструкторских решений D , которые позволяют обеспечить работоспособность в широком диапазоне внешних воздействий, превышающих заданный в ТЗ уровень, то апостериорная вероятность слабо зависит от априорной вероятности. То есть задача конструирования в ус-

ловиях неполных знаний сводится к максимизации функции правдоподобия при неполных знаниях с учётом (3.3):

$$D_0 = \arg \max_D P(D|h_{\max}) \Leftrightarrow \max P(D|h_{\max}) = P(D_0|h_{\max}). \quad (3.5)$$

Выражение (3.5) означает, что при неполных знаниях об условиях и режимах эксплуатации конструкцию следует разрабатывать с учётом неблагоприятных сочетаний худших из известных факторов в расширенном диапазоне внешних воздействий и режимов эксплуатации. Основным приёмом максимизации функции правдоподобия при неполных знаниях (3.5) на практике является резервирование [150]:

- *структурное* – за счёт введения в систему резервных (избыточных) элементов, которые при абсолютной надёжности элементов исходной системы не будут функционально необходимыми;
- *функциональное* – за счёт выполнения заданной функции разными способами и (или) техническими средствами;
- *нагрузочное* (параметрическая избыточность) – за счёт удаления области состояний объекта от границ области работоспособности, определяемых предельными допустимыми значениями выходных параметров, что соответствует сужению области возможных состояний E (2.63) и/или расширению области работоспособных состояний G (2.76).

Наиболее известная инженерная практика по максимизации функции правдоподобия (3.5) – применение запасов прочности и коэффициентов безопасности при расчётах на прочность по детерминированным величинам нагрузки и несущей способности (2.21). Менее известен способ максимизации функции правдоподобия (3.5) – создание запасов движущих моментов (сил) k (2.45) при выборе приводов раскрытия. Другие частные примеры технических решений при конструировании, направленные на максимизацию функции правдоподобия (3.5), будут рассмотрены ниже.

Выражения (3.4)–(3.5) показывают, что даже при неполных априорных знаниях h всегда существует возможность принятия истинных технических решений на основе косвенных характеристик правдоподобия $D|h$, что позволяет при неизвестных точных значениях $P(h)$ получить степень правдоподобия принятых решений $P(D|h) \rightarrow 1$.

Задача конструирования изделий с малой вероятностью отказа заключается в том, чтобы в условиях неопределенностей принять такие конструкторские решения, характеризуемые $D|h$, степень правдоподобности которых была бы близка к 1. Методология конструирования в этом случае должна быть направлена преимущественно на относительное сравнение эффективности принимаемых решений и выявление таких закономерно-

стей в организации и осуществлении функционирования, которые бы оставались неизменными в широком диапазоне внешних воздействий [92]. Например, на методах конструирования с использованием принципа гарантированного результата, основанного на ограничении диапазона реализации случайных параметров с применением минимаксного критерия, по которому параметры рассчитывают для наихудших условий их реализации [151]. Предоставление объективных доказательств существования таких решений приводит к тому, что с учётом (3.4) апостериорная вероятность будет стремиться к 1:

$$\because P(D|h) \rightarrow 1 \therefore P(h|D) \rightarrow 1, \quad (3.6)$$

при этом ВБР $P(t)$ подчиняется неравенству

$$P(D|h) \geq P(h|D) \geq P(t), \quad (3.7)$$

Условие надёжности для (3.7) имеет вид

$$P(t) > P_{\text{зад}}. \quad (3.8)$$

Условие (3.8) с учётом (3.5)–(3.6) позволяет рассматривать смысл задания требований, характеризующих малую вероятность отказов как принятие таких технических решений, которые в случае предоставления доказательств об их истинности обеспечивают степень правдоподобия $P(D|h) \rightarrow 1$ вне зависимости от полноты априорных знаний h .

Если $P(D|h) \approx 1$, то апостериорную вероятность можно рассматривать как меру субъективной оценки рисков понесения финансовых убытков, не связанных с инженерно-техническими задачами обеспечения надёжности изделий, т. е. обусловленных отказами, выходящими за рамки заданных условий и режимов эксплуатации, например из-за внезапных (форс-мажорных) техногенных (как попадание извне фрагментов технических устройств в функциональные узлы подвижных механизмов) или природных (как столкновение с метеоритами) воздействий. Подобного рода техногенное воздействие произошло в 1973 г. на орбитальной станции «Skylab», когда на участке выведения со станции сорвало теплоизолирующий экран, который вырвал одну панель БС и заклинил механизм раскрытия другой панели (см. табл. 2.1). В этом случае мы имеем дело с запроектными отказами (авариями), вызванными «не учитываемыми для проектных аварий исходными событиями» [152].

Ориентировочные соотношения нормированных значений вероятностей проектных и запроектных аварий и реальных аварий при функционировании различных потенциально опасных систем приведены в табл. 3.3 [153].

Вероятности крупных аварий (1 год)

Типы объектов		Расчётные аварии		Реальные аварии
		проектные	запроектные	
Реакторы	Активная зона	10^{-6}	10^{-8}	$2 \cdot 10^{-3}$
	Первый контур	10^{-5}	10^{-6}	$5 \cdot 10^{-3}$
Системно-космические объекты		10^{-3}	10^{-5}	$5 \cdot 10^{-2}$
Турбоагрегаты		10^{-3}	10^{-4}	$3 \cdot 10^{-3}$
Летательные аппараты		10^{-3}	10^{-4}	$5 \cdot 10^{-3}$
Трубопроводы (1000 км)		$2 \cdot 10^{-3}$	10^{-4}	10^{-2}

С учётом условия (3.7) можно рассматривать задачу обеспечения надёжности как два независимых процесса:

- инженерно-технического, обусловленного приданием разрабатываемому изделию таких свойств, которые направлены на выполнение своего служебного назначения с близкой к 1 вероятностью;
- вероятностно-статистического, связанного с апостериорными методами оценки рисков понесения убытков в случае возникновения запроектных отказов во время использования изделий при возникновении форс-мажорных обстоятельств.

В случае применения недостаточно развитой методологии инженерно-технического обеспечения надёжности, вероятностно-статистические методы надёжности отражают учёт системных ошибок разработчиков и изготовителей изделий в виде параметров статистических отклонений вероятностных моделей. Без проведения надлежащих анализов надёжности или без проведения анализов надёжности как таковых степень правдоподобия принятых решений $P(D|h)$ не оценивается, соответственно неравенство (3.7) принимает вид

$$P(t) \leq P(h|D). \quad (3.9)$$

Условие (3.8) с учётом (3.9) без инженерно-технического обеспечения надёжности приводит к необходимости рассматривать смысл задания требований, характеризующих вероятность отказов, как частотный показатель, характеризующий реальные отказы, отраженные в табл. 3.3. А это приводит к привлечению математического аппарата теории надёжности на основе вероятностно-статистических моделей, что для изделий одноразового срабатывания неприемлемо.

Следует отметить, что инженерно-техническая и вероятностно-статистическая составляющие процесса обеспечения надёжности в конечном счёте направлены на максимизацию функции правдоподобия (3.5), по-

этому разработка методик принятия обоснованных технических решений при конструировании и анализ причин отказов при штатных раскрытиях (см. табл. 2.1), равно как и при НЭО, являются в одинаковой степени важными составляющими процесса обеспечения надёжности. Задача инженерно-технических методов надёжности – не допустить на предэксплуатационных стадиях ЖЦ возникновения причин отказов, которые могут быть предотвращены исходя из априорных и апостериорных познаний разработчиков и экспертов. Задача вероятностно-статистических методов надёжности заключается в накоплении апостериорных знаний, основанных на сборе, изучении, систематизации, статистической обработке данных, полученных в результате практического опыта.

3.6. Примеры технических решений по максимизации функции правдоподобия в условиях неопределённостей

Вернёмся к рассмотрению примера поворота штанги из стартового положения в рабочее за счёт высвобождения упругой энергии деформации торсиона (см. рис. 2.3). Выполнение условия осуществления поворота штанги (2.18) достигается за счёт максимизации косвенных характеристик $D|h$ технических решений, применяемых в конструкции шарнира и торсиона, по результатам проведения наземных экспериментов, опытов, испытаний, анализов, оценок и расчётов в процессе разработки конструкции.

Значения движущего момента $M_{дв}$ в значительной степени определяются зависимостью от конструктивных параметров θ торсиона (физико-механических характеристик материала, конструктивных размеров, жёсткости, параметров конструктивно-компоновочных схем) и в меньшей зависимости от температуры окружающей среды $T_{ср}$:

$$M_{дв} = L(\theta, T_{ср}). \quad (3.10)$$

Значения момента сил сопротивления M_c в основном зависят от температуры окружающей среды $T_{ср}$ и обобщающего параметра ϑ , который характеризует способ создания $M_{дв}$ (в общем случае силой, действующей на плече относительно оси вращения шарнира, что характерно для пружин растяжения, кручения или часовых пружин, либо «чистым» моментом вращения под действием пары сил, что характерно для торсионов) и конструктивное исполнение фиксатора конечного положения:

$$M_c = L(T_{ср}, \vartheta), \quad (3.11)$$

Максимально допустимое значение движущего момента $M_{\text{дв}}(\varphi)$, которое может развивать привод, определяется из уравнения, описывающего закон сохранения кинетической энергии поворота и потенциальной энергии деформации изгиба штанги в результате мгновенного наложения механической связи в шарнире при фиксации в рабочем положении.

Закон сохранения энергии, выраженный через работу внешних сил, имеет вид

$$A_{\text{дв}}(\varphi) - A_c(\varphi) = \Pi, \quad (3.12)$$

$$\text{здесь } A_{\text{дв}}(\varphi) = \int_{\varphi}^{\varphi_{\text{н}}} M_{\text{дв}}(\varphi) d\varphi; A_c(\varphi) = \int_{\varphi}^{\varphi_{\text{н}}} M_c(\varphi) d\varphi; \Pi = \frac{1}{2} \int_l \frac{M^2(x)}{EJ} dx,$$

где $A_{\text{дв}}(\varphi)$ – работа движущего момента торсиона на угле раскрытия; $A_c(\varphi)$ – работа сил сопротивления на пути перемещения штанги; Π – потенциальная энергия деформации штанги в рабочем положении.

Получить точное решение уравнения (3.12) можно только при известных зависимостях (3.10)–(3.11). В начале конструирования, когда указанные зависимости неизвестны, решают уравнение (3.12) исходя из несущей способности штанги при условии

$$A_c(\varphi) = 0. \quad (3.13)$$

Движущий момент, создаваемый торсионом, принимается равным

$$M_{\text{дв}}(\varphi) = c_M \cdot \varphi,$$

где c_M – жёсткость торсиона.

Соответственно работа движущих сил равна [15]

$$A_{\text{дв}}(\varphi) = \int_{\varphi}^{\varphi_{\text{н}}} c_M \varphi d\varphi = c_M \frac{\varphi_{\text{н}}^2 - \varphi^2}{2}. \quad (3.14)$$

Потенциальная энергия деформации консольной балки постоянного сечения с приведённой силой на свободном конце, учитывающей равномерное распределение масс и эпюру угловых скоростей на момент фиксации по длине консоли, определяется по формуле

$$\Pi = \frac{1}{6} \frac{P_{\text{пр}}^2 \cdot l^3}{EJ}, \quad (3.15)$$

где $P_{\text{пр}}$ – приведённая сила на конце консоли; l – длина штанги; E – модуль упругости материала штанги; J – момент инерции поперечного сечения штанги.

Находим предельное значение потенциальной энергии по допустимым напряжениям изгиба штанги с учётом (3.15):

$$P_{\text{пред}} = \frac{1}{6} \frac{(\sigma_{\text{доп}} \cdot W)^2}{EJ} \cdot l, \quad (3.16)$$

где $\sigma_{\text{доп}}$ – допустимое напряжение изгиба материала штанги; W – момент сопротивления поперечного сечения штанги.

Поскольку в соответствии с рис. 2.5 разница между значениями $M_{\text{дв}}^{\text{мин}}$ и $M_{\text{с}}^{\text{макс}}$ в неравенстве (2.42) будет минимальной в конце поворота штанги, то уравнение (3.12) с учётом (3.13)–(3.16) решают путём оптимизации зависимости

$$M_{\text{дв}}(\varphi_{\text{к}}) = L(\sigma_{\text{доп}}), \quad (3.17)$$

при заданных значениях $\varphi_{\text{н}}$, $\varphi_{\text{к}}$, c_M , E , W , J и l .

Исходя из решения (3.17) выбирают параметры конструктивного исполнения торсиона θ (3.10) и задают конструктивные параметры шарнира ϑ (3.11).

Максимизация функции правдоподобия (3.5) осуществляется за счёт выбора допустимых значений движущего момента на приводе $M_{\text{дв}}$ исходя из несущей способности конструкции, что позволяет обеспечить максимально возможный запас движущего момента k , несмотря на отсутствие изначальных знаний о значениях моментов сил сопротивления $M_{\text{с}}$. Формально подтверждают заданный запас движущего момента на испытаниях в соответствии со схемой, приведённой на рис. 2.7, после изготовления опытного образца штанги с предварительно выбранными параметрами привода и ШУ (3.10)–(3.11).

Практически всегда существует возможность максимизировать функцию правдоподобия (3.5) за счёт принятия соответствующих конструкторских решений D , которые расширяют функциональные возможности изделий в условиях неопределённых ограничений, т. е. отсутствия истинных знаний h об условиях и режимах эксплуатации.

3.6.1. Пример снижения вероятностей заклинивания поворотных конструкций при тепловых воздействиях

При тепловых воздействиях за счёт разности *коэффициентов линейного теплового расширения* (КЛТР) материалов опорного основания КА и конструкции МУ ОС в стартовом положении в замках зачековки могут возникать распорные реакции, как результат сжатия/растяжения конструкций при тепловом воздействии. Возникновение распорных реакций требует дополнительной энергии приводов для страгивания и раскрытия поворотных частей конструкций сверх необходимой для нормальных (проектных) условий.

Для иллюстрации причин возникновения распорных реакций при тепловых воздействиях можно использовать схему закрепления штанги в стартовом положении φ_n (см. рис. 2.3) в виде двухопорной балки с цилиндрическими неподвижными опорами [154], одна из которых является опорным элементом замка (2), а другая – шарниром штанги (4).

Распорное усилие в сечениях балки при тепловом воздействии определяется по формуле

$$P = E \cdot F \cdot \varepsilon,$$

здесь $\varepsilon = \Delta t (\alpha_1 - \alpha_2)$,

где E – модуль упругости; F – площадь поперечного сечения балки; ε – относительное удлинение балки; Δt – расчётная разница температур между рабочей температурой и температурой при монтаже; α_1, α_2 – КЛТР материала балки и материала опорного основания, на котором расположены опоры балки.

Распорное усилие приводит к возникновению реакций в опорных узлах штанги при тепловом воздействии, которые вызывают силы сопротивления в подвижных узлах, препятствующие срабатыванию замка после разделения. В результате этого энергии привода раскрытия может быть недостаточно для преодоления сил сопротивления, вызываемых распорными реакциями в опорах штанги.

В двухопорной балке постоянного сечения дополнительная сила сопротивления N в каждом из опорных узлов при возникновении распорных реакций, которую необходимо преодолеть приводам раскрытия, будет равна

$$N = \frac{P}{2} \cdot \mu,$$

где μ – коэффициент трения скольжения в опорных узлах штанги.

Для исключения возникновения распорных реакций в одном из опорных узлов (как правило, в замке) обеспечивают подвижность цилиндрической опоры [154], свободные перемещения которой превышают совместные тепловые деформации закрепляемой конструкции и опорного основания:

$$\Delta l > l \cdot \varepsilon,$$

где Δl – свободные перемещения балки в опоре; l – длина пролёта балки.

Схему размещения подвижных и неподвижных цилиндрических опор при закреплении конструкции к опорному основанию, которая исключает возникновение распорных реакций в опорах при тепловом воздействии, но позволяет воспринимать внешние силовые нагрузки, называют **схемой тепловых развязок** [155; 156]. Одна из возможных схем тепловых развязок континуальных конструкций в плоскости расположения опор показана на рис. 3.7 [155].

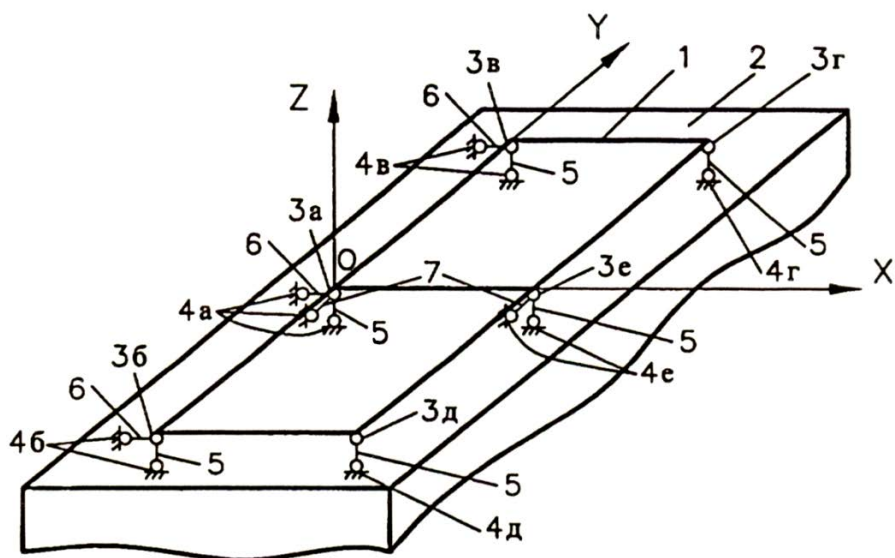


Рис. 3.7. Схема закрепления изделия на опорном основании, обеспечивающая тепловую развязку в нестационарном поле температур

Плоское изделие (1), имеющее протяженные размеры, закрепляют на основании (2) следующим образом:

- в сопряжении опорных узлов изделия (3а...3е) с соответствующими им опорными узлами основания (4а...4е) один из опорных узлов изделия (3а) закрепляют неподвижно относительно опорных узлов основания (4а...4е), накладывая механические связи (5...7);
- начало декартовой прямоугольной системы координат XYZ совмещают с неподвижным опорным узлом изделия (3а), при этом одну из координатных плоскостей OYX совмещают с плоскостью, на которой лежат опорные узлы изделия (3а...3е);
- образующие координатную плоскость OYX координатные оси X и Y совмещают с линиями, пересекающими неподвижный опорный узел изделия (3а), на которых находится как можно большее количество опорных узлов изделия; на каждой из линий, совмещенной с соответствующей координатной осью, но не менее одного, кроме неподвижного (по оси X совмещают опорные узлы изделия (3б) и (3в), по оси Y – опорный узел изделия (3е));
- в опорных узлах изделия, лежащих на линиях, которые пересекают неподвижный опорный узел изделия, «накладывают» механические связи, обеспечивающие возможность линейных перемещений опорных узлов изделия относительно опорных узлов основания вдоль упомянутых линий (в опорных узлах изделия (3б) и (3в) накладывают механические связи (6), в опорном узле (3е) – механическую связь (7));
- в опорных узлах изделия (3г) и (3д), не лежащих на линиях, совмещенных с координатными осями X и Y, «накладывают» механические

связи (5), обеспечивающие возможность их линейных перемещений относительно соответствующих опорных узлов основания в координатной плоскости ОХУ.

Принцип, обеспечивающий тепловую развязку изделия (1) с опорным основанием (2), основан на том, что вектор перемещения любой точки тела в плоскости расположения опор относительно неподвижной опоры (3) в декартовой системе координат можно выразить с помощью формулы разложения векторов:

$$a = a_x \cdot i + a_y \cdot j,$$

где a_x , a_y – прямоугольные декартовы координаты вектора; i , j – единичные векторы.

Схема, приведённая на рис. 3.7, позволяет снизить вероятность заклинивания поворотной конструкции при раскрытии в широком диапазоне тепловых воздействий, в том числе когда направление тепловых потоков заранее неизвестно или же температурное поле неоднородно, чем достигается максимизация функции правдоподобия (3.5) независимо от полноты априорных знаний h о факторах, вызывающих тепловые воздействия.

3.6.2. Пример снижения уровня монтажных деформаций

Монтажные деформации в опорах замков наравне (или совместно) с тепловыми деформациями могут приводить к заклиниваниям при срабатывании замков, а в совокупности с механическими нагрузками – к недопустимым деформациям или к неопределённостям **напряжённо-деформированного состояния** (НДС) [157], что неприемлемо при высоких требованиях к точности закрепляемых конструкций.

Снижение монтажных деформаций при закреплении конструкций в стартовом положении может быть достигнуто последовательными действиями при сборке панели, показанными на рис. 3.8–3.10 [158].

Панель (1) (рис. 3.8) закрепляется в узлах (2–5) с помощью наложения механических связей в замках, включающих прижимы, опорные элементы панели и основания (замки показаны схематично в виде цилиндрических опор, ограничивающих линейные перемещения). Количество замков (в данном случае четыре) и их положение определяется, например, критичностью пролётов панели по условиям прочности при эксплуатации.

Исходя из условия статического равновесия, количество замков и накладываемых в них механических связей в процессе сборки может быть снижено (рис. 3.9). Поскольку условия сборки всегда можно регла-

ментировать, то количество таких узлов и механических связей выбирают из числа имеющихся (рис. 3.8) с учётом обеспечения критичности пролётов панели по условиям прочности при монтаже. Порядок закрепления предполагает использовать выбранные таким образом узлы в качестве реперов, задавая их уровень при монтаже заведомо выше: так, чтобы после сопряжения опорных узлов лишние с точки зрения монтажа опорные узлы панели «зависали» над опорными узлами основания.

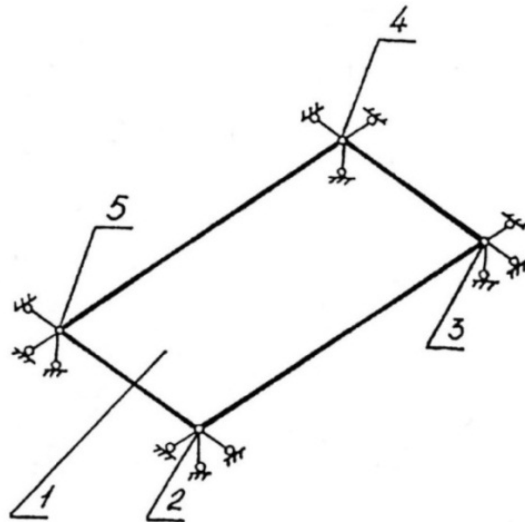


Рис. 3.8. Схема закрепления панели и направления накладываемых механических связей

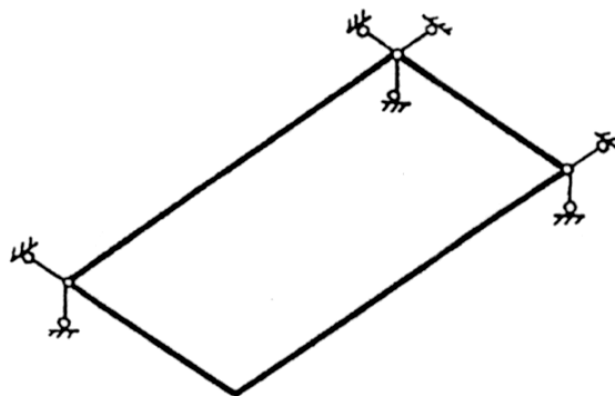


Рис. 3.9. Вариант наложения механических связей для обеспечения условия статического равновесия при монтаже

Сопряжение опорных узлов вне реперов производится путём регулировки положения опор в соответствии с направлениями, показанными на рис. 3.10.

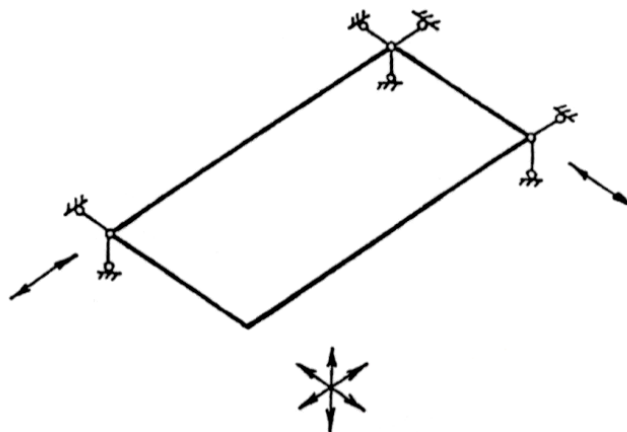


Рис. 3.10. Направления регулировки положения опор перед окончательным наложением механических связей

Порядок сопряжения опорных узлов вне реперов определяется исходя из конкретных требований конструкции. Регулировка положения опор может быть произведена известными методами, включающими регулировку силой или перемещением, при этом монтажные нагрузки контролируют по заданным величинам зазоров или натягов. После регулировки положения опор осуществляют окончательное наложение механических связей (рис. 3.10), чем достигается снижение уровня монтажных деформаций. В качестве примеров реализации указанного способа могут служить болтовые соединения для регулировки положения соединяемых деталей [159; 160].

Установление в КД требований по выполнению указанного порядка действий при сборке приводит к снижению уровня монтажных деформаций, что способствует максимизации функции правдоподобия (3.5) за счёт исключения (минимизации) факторов неопределённости НДС конструкции.

3.6.3. Пример повышения надёжности при страгивании

Как известно [161], для начала осуществления любого движения необходимо преодолеть трение покоя, которое выше трения скольжения. Кроме того, при использовании в парах трения ТСП на основе MoS_2 обнаружено явление, получившее название «стоп-эффект» [100], которое приводит к резкому (до двух раз) возрастанию трения в начальной фазе работы механизма после продолжительной неподвижности. Чтобы необоснованно не завышать энергоёмкость приводов раскрытия, в конструкциях МУ ОС дополнительно используют пружинные толкатели, с помощью которых поворотным частям конструкций сообщают начальный импульс движения, помогая тем самым приводам раскрытия преодолевать началь-

ное сопротивление [15; 23]. Такие толкатели устанавливают отдельно от замков или встраивают в них, как показано на рис. 3.11, 3.12 [61].

В стартовом положении кривошип (1) связан шарниром (2) с опорным основанием, представляющим собой корпус замка (3). Равновесие кривошипа (1) обеспечивается гибкой механической связью (4) и пружиной (5). Кривошип (1) соединен шарниром (6) с шатуном (7), а тот, в свою очередь, шарниром (8) и колодкой (9). Колодка (9) закреплена шарниром (10) на корпусе замка (3). Рычаг (11) связан шарниром (12) с корпусом замка (3). Взаимоположение дополнительного рычага (11) выбрано так, что ось вращения шарнира (10) колодки (9) лежит в плоскости вращения рычага (11). При этом рычаг (11) опирается на колодку (9) болтом (13) и поджат к ней пружиной (14), которая соединена с корпусом (3). Колодка (9) может быть выполнена в виде кулачка, имеющего цилиндрическую поверхность с центром в шарнире (10).

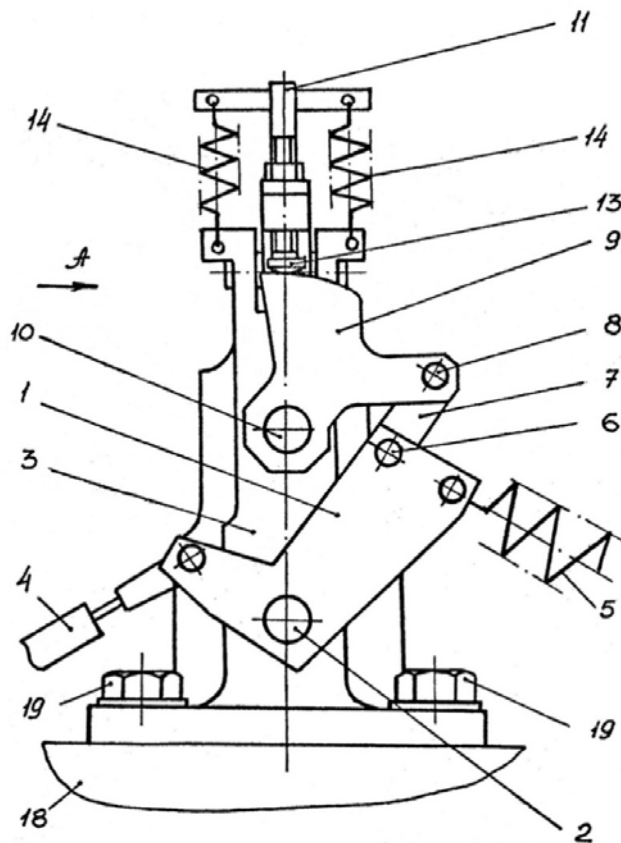


Рис. 3.11. Замок в стартовом положении

В корпусе (3) имеется ложемент (15) для закрепляемого элемента конструкции (16), который размещён между рычагом (11) и пружинным толкателем. Толкатель встроен в корпус замка (3) и содержит шток (17а), пружину (17б), и стопорный элемент (17в). Перемещение болта (13) по

резьбе обеспечивает необходимый контакт между рычагом (11) и закрепляемой конструкцией (16) в стартовом положении замка. Замок устанавливают на КА (18) с помощью крепёжных элементов (19).

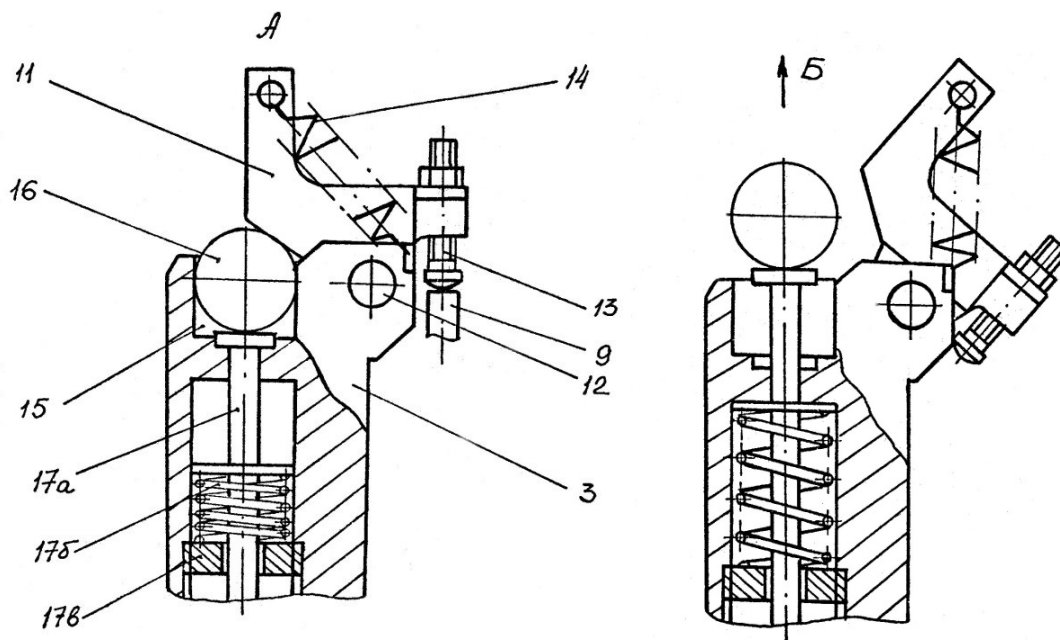


Рис. 3.12. Положения закрепляемого элемента конструкции в стартовом положении и после срабатывания замка

Замок работает следующим образом. При ослаблении механической связи (4) пружина (5) приводит кривошип (1), шатун (7) и колодку (9) в движение. При этом болт (13), поджимаемый пружиной (14), скользит по колодке (9). В результате описанного движения болт (13) теряет контакт с колодкой (9). После этого рычаг (11) под действием пружины (14) поворачивается и освобождает выход конструкции (16) из ложеента (15) в направлении Б. Одновременно шток толкателя (17а) под действием пружины (17б) выталкивает конструкцию (16) из ложеента (15).

Максимизация функции правдоподобия (3.5) при использовании толкателя достигается не только за счёт выбора энергии его пружины, необходимой для страгивания конструкции из исходного положения. Не менее важны конструктивные решения по выбору хода толкателя, при котором обеспечивается сопровождение толкателем поворотной конструкции (16) (выталкивание с сохранением контакта) до полного выхода закрепляемых элементов из зоны сопряжения с замком. В представленном примере ход пружины (17б) толкателя при срабатывании замка обеспечивает полный выход элемента конструкции (16) из ложеента (15), а её потенциальная энергия обеспечивает преодоление сил трения в опорных узлах при начальном страгивании.

3.6.4. Примеры снижения моментов сил сопротивления в шарнире

Основной составляющей момента сил сопротивления повороту в ШУ являются моменты на скручивание или изгиб жгута транзитных межпанельных электрических кабелей, которые из-за физико-механических характеристик материала защитной оплётки имеют значительный разброс значений жёсткости при отрицательных и положительных температурах. На увеличение момента сил сопротивления может влиять способ прокладки жгута кабеля относительно оси поворота в результате действия реактивной составляющей сил при деформации жгута кабеля, препятствующих повороту в шарнире. В какой-то степени минимизировать сопротивление кабелей при поворотах можно конструктивными способами, формируя петлю кабелей так, чтобы она проходила через промежуточный узел крепления, выполненный соосно с осью вращения ШУ [162]. Конструктивные варианты электрических соединений в ШУ приведены на рис. 3.13, 3.14, где (1), (2) – панели БС, (3) – вилка шарнира, (4) – проушина, (5) – ось шарнира, (6) – электрический кабель, (7) – элемент крепления электрического кабеля с панелью, (8) – элемент крепления электрического кабеля с электрической сетью солнечной батареи, (9) – кронштейн, поддерживающий электрический кабель соосно оси вращения шарнира с помощью элементы крепления (9а, 9б, 9в).

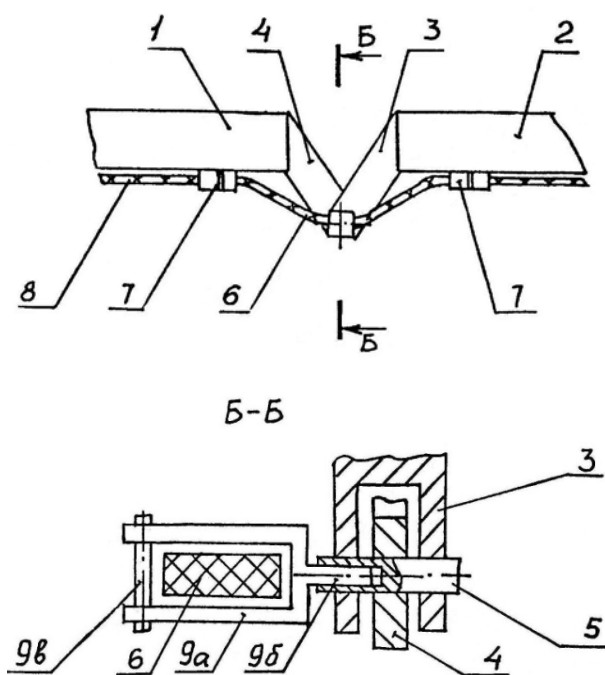


Рис. 3.13. Электрическое соединение в ШУ панелей БС с изгибом транзитного кабеля

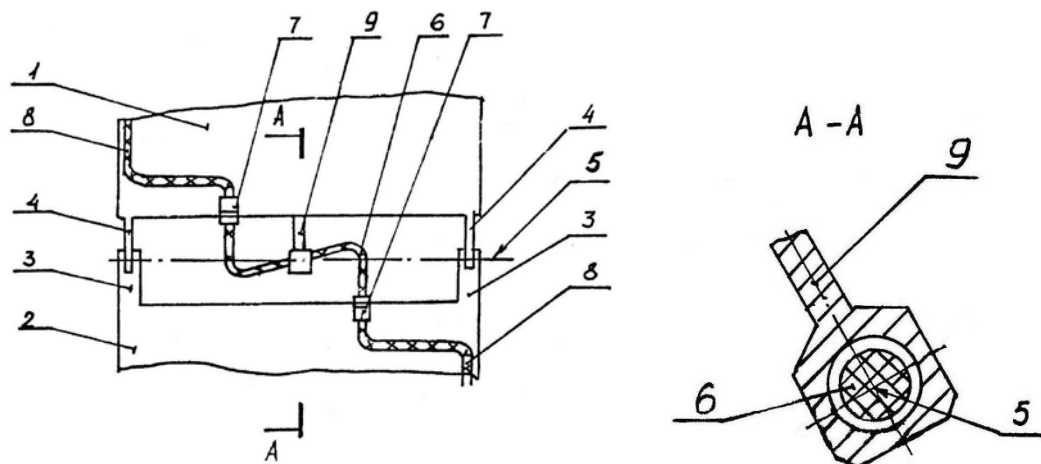


Рис. 3.14. Электрическое соединение в ШУ панелей БС с кручением транзитного кабеля

Приведённый пример формирования жгута кабеля в межпанельной зоне не единственный способ максимизации функции правдоподобия (3.5) при конструировании ШУ. Важным способом максимизации функции правдоподобия является исключение вероятности зацепления жгута кабеля за подвижные части конструкции в результате вибраций на активном участке и воздействия невесомости на орбите. Например, причиной частичного нераскрытия панели БС на КА Telstar 14R послужило заедание механизма раскрытия вследствие попадания в него жгута электрического кабеля (см. табл. 2.1). Для исключения вероятностей зацеплений необходимо производить моделирование (в 3D-модели или на физическом макете) пространственных положений жгута кабеля так, чтобы при любом его принудительном отклонении от статичного положения не возникала угроза зацеплений. В случае возникновения такой угрозы следует уменьшать длину петли кабеля или вынести потенциально опасные (с позиций зацеплений) элементы конструкций за зону перемещения кабелей при их принудительном отклонении.

3.6.5. Пример повышения достоверности расчётов на конструкционную прочность

В число конструкторских решений, позволяющих максимизировать функцию правдоподобия (3.5), входят не только конструктивные решения, но и методы проведения расчётов. И дело здесь не столько в точности выполнения вычислений [163], сколько в повышении достоверности полученного результата (лучше иметь цифру с одним значащим числом после запятой и быть уверенным в её достоверности, чем иметь пять значащих чисел после запятой и не ощущать, что это означает на самом деле). Конструктору важно понимать какие (и самое главное – где) у него существуют запасы на

неопределённость. Для этого важна каждая из процедур проведения расчётов на конструкционную прочность – от составления исходных данных до оценки достоверности полученных результатов. Использование компьютеров для расчётов может создать иллюзию безупречности полученных результатов, однако компьютер – это всего лишь быстродействующий инструмент для проведения вычислений, который работает по строго заданному алгоритму исходя из тех исходных данных, которые в него заложил человек. Задача человека – подготовить достоверные исходные данные и уметь компетентно интерпретировать полученные результаты. Согласно этой идее процедуры повышения достоверности и снижения неопределённости при оценке прочности конструкции, выходящие за рамки проектных расчётов, имеют такую последовательность [157]:

1) проведение анализа физико-технических процессов и явлений, протекающих в техническом объекте, механических эффектов вследствие геометрических, физических и структурных нелинейностей. Установление путём испытаний комплекса механических свойств материалов с учётом нелинейностей. Сопоставление их со свойствами, принятыми при проектировании;

2) выполнение анализа КД и ТД для выявления потенциальных источников НДС, обусловленных технологией и монтажом, которые нельзя достоверно оценить количественно. Когда найдены источники неопределённости НДС, тогда разрабатывают технические предложения по их устранению или регламентированию, например, обеспечивается свобода тепловых деформаций при закреплении (см. п. 3.6.1), ограничивается уровень монтажных напряжений при сборке (см. п. 3.6.2), снимаются внутренние остаточные напряжения после сварки [164] и т. п.;

3) определение источников и характера внешних нагрузок, обоснование расчётных нагружений. Оценка полноты и обоснованности нагружений, учтённых при проектировании. Оценка точности граничных условий конечно-элементной модели и их соответствия условиям нагружения реальной конструкции;

4) оценка НДС элементов конструкций с использованием таких аналитических расчётных схем механики деформируемого твёрдого тела, которые обеспечивают заведомо завышенные и заниженные значения (предполагается, что для любого элемента можно использовать несколько схем). Цель данной процедуры – определение области существования полученного результата (ограничение физически возможными минимальными и максимальными значениями). Считается, что уточнённые результаты численного анализа находятся в этом интервале;

5) установление характера и особенностей деформирования элементов конструкции, а также применяемые для их дискретизации виды конеч-

ных элементов. В этом случае оценивается адекватность выбранной математической модели деформирования сплошной среды с учётом построения матрицы жёсткости конечного элемента выбранного вида;

б) оценка адекватности конечно-элементной дискретизации конструкции. Это предполагает анализ результатов сходимости численных решений при варьировании параметров сетки конечных элементов в зонах высоких градиентов напряжений и деформаций.

Указанные процедуры расчётов на конструкционную прочность позволяют максимально использовать имеющиеся возможности для снижения опасности принятия некорректных решений и исключения системных ошибок при разработке технических объектов, что в конечном счёте также приводит к максимизации функции правдоподобия (3.5).

3.7. Конструирование как процесс моделирования надёжных изделий

Помимо принятия конструкторских решений в условиях неопределённости, процедуры конструкторского обеспечения предусматривают перевод требований ТЗ для проектирования на язык требований КД (проектной и/или рабочей), которую выпускают согласно этапам выполнения работ на каждой из стадий разработки [108] в соответствии с видами и номенклатурой, определёнными в стандарте [148].

Требования КД обязательны при изготовлении и эксплуатации, именно их выполнение приводит к достижению заданных параметров изделий и в итоге к выполнению требований к проектированию.

Требования КД и виды документов, отражающие их содержание, включают: требования к изготовлению (чертежи деталей, сборочные чертежи, спецификации, ведомости покупных изделий и т. п.); контролю параметров (чертежи деталей и сборочные чертежи); испытаниям (программы и методики); расчётам (расчётные документы); эксплуатации (эксплуатационные документы).

Взаимосвязь между требованиями ТЗ и КД осуществляется на основе методов оптимального проектирования [165]. Для формального описания указанной взаимосвязи требований используют совокупность параметров: внешних и внутренних, образующих векторы внешних $\vec{Y} = (Y_1, Y_2, \dots, Y_m)$ и внутренних параметров $\vec{X} = (X_1, X_2, \dots, X_n)$.

Совокупность внешних параметров \vec{Y} описывает изделие с точки зрения заказчика и входит в ТЗ на проектирование. Совокупность внутренних параметров \vec{X} описывает изделие с точки зрения разработчика,

и её выбирают в процессе разработки. Строгой границы между внутренними и внешними параметрами изделия не существует, некоторые параметры могут быть использованы одновременно как внешние, так и внутренние. Примерами могут служить требования:

- по безотказности, которое является внешним параметром, задаваемым в ТЗ на проектирование, а соответствующие ему внутренние параметры задают совокупностью требований КД для изготовления в виде конкретных конструкционных материалов, типов (способов) соединений и регулировок элементов конструкции, требуемых расчётов и испытаний, средств и методов контроля параметров изготовления и т. п.

- по габаритным размерам изделия, которые является одновременно внешним и внутренним параметром.

Внешние и внутренние параметры изделия связаны зависимостями, которые можно представить в виде системы уравнений:

$$\begin{cases} Y_1 = f_1(X_1, X_2, \dots, X_n) \\ \dots \\ Y_m = f_m(X_1, X_2, \dots, X_n) \end{cases} \quad (3.18)$$

Система (3.18) образует уравнения связи $F(\vec{X}, \vec{Y})$ между внешними и внутренними параметрами, отображающими структуру изделия, алгоритмы его функционирования и связи с другими иерархическими структурами системы в заданных условиях и режимах эксплуатации. По сути (3.18) представляет собой математическую модель проектируемого изделия в виде математических соотношений, показывающих функционирование в заданных условиях.

Согласно обобщённой параметрической модели (см. раздел 2.8) процедуры конструкторского обеспечения изделий в соответствие с (3.18) должны предусматривать:

- выбор внутренних параметров, выполнение которых должно быть в обязательном порядке обусловлено требованиями КД;
- определение значений внутренних параметров;
- обоснование значений внутренних параметров в области работоспособных состояний при заданных условиях и режимах эксплуатации;
- установление требований в КД, необходимых и достаточных для обеспечения заданного уровня качества и надёжности.

Решение уравнений (3.18) возможно при условии выбора необходимых и достаточных внутренних параметров для удовлетворения заданным внешним параметрам. Очевидно, что внутренних параметров всегда больше, чем внешних, но поскольку они находятся во взаимосвязи $F(\vec{X}, \vec{Y})$,

то, решая уравнения (3.18), работоспособность системы следует оценивать с учётом значений всех внутренних параметров, характеризующих способность выполнить заданные в ТЗ функции и при этом соблюдать условие релевантности значений внутренних параметров требованиям НТД и КД.

КД определяет все технические решения, необходимые и достаточные для выполнения изделием своего служебного назначения, и содержит полную графическую, схемную, текстовую и иную информацию для осуществления производства с требуемым процентом выхода работоспособных изделий. Это означает, что в КД должны быть установлены значения всех размеров (включая сопряжения и регулировки) и функциональных параметров, которые, с одной стороны, обеспечивают сборку и настройку изделия в процессе изготовления, а с другой – позволяют изделию выполнить свои функции при эксплуатации. Число таких размеров и параметров (далее, просто параметров) может быть достаточно велико и в общем случае равно n .

Значения параметров задаются в КД номинальными величинами и пределами допусков на их реализацию [166]:

$$X^H = (X_1^H, X_2^H, \dots, X_n^H)^T, \quad (3.19)$$

$$\Delta X = (\Delta X_1, \Delta X_2, \dots, \Delta X_n)^T. \quad (3.20)$$

Предполагается, что если при изготовлении ДСЕ все параметры отклонятся от номинальных значений (3.19) не более чем предусмотрено соответствующими допусками (3.20), то они обеспечат сборку изделия с заданной функциональностью, т. е. будут соответствовать пригодности изделия к эксплуатации.

На практике не всегда номинальные размеры находятся внутри поля допуска, например когда X_{+a}^{+b} (случай посадки с натягом). Поэтому допуски (3.20) удобнее определять как разность между наибольшими и наименьшими допустимыми отклонениями параметров:

$$\Delta X_i = X_i^{\max} - X_i^{\min}, \quad (3.21)$$

при этом действительные значения всех параметров, заданные в чертежах номинальными величинами (3.19), должны находиться внутри допусков (3.20):

$$X_i^{\min} \leq X_i \leq X_i^{\max}. \quad (3.22)$$

При изготовлении одной или разных партий изделий все параметры, заданные в чертежах, могут рассматриваться как функции от времени $X_i(t)$.

При этом установленные в КД границы наибольших и наименьших значений параметров (3.22) для годных изделий не могут быть нарушены, поэтому при любой партионности изделий все действительные значения параметров $X_i(t)$, как случайные величины, будут также находиться внутри допуска:

$$X_i^{\text{мин}} \leq X_i(t) \leq X_i^{\text{макс}}. \quad (3.23)$$

Выброс случайных величин за границы допусков (3.23) квалифицируется как производственный брак $X_{\text{брак}}$, который характеризуется следующими возможными значениями параметров $X_i(t)$:

$$X_{\text{брак}} \in \left\{ X_i(t) \mid X_i(t) < X_i^{\text{мин}} \vee X_i(t) > X_i^{\text{макс}} \right\}. \quad (3.24)$$

Таким образом, если допустить, что в КД установлены все значения параметров и их допуски, обеспечивающие сборку и функционирование изделия (при этом на производстве должным образом осуществляется технический контроль качества), то «поведение» такого изделия детерминировано ограничениями установленных в КД допусков.

Формула (3.23) позволяет рассматривать комплект КД как модель изделия с неизменными границами допусков ΔX_i , внутри которых соответствующие параметры $X_i(t)$ изменяют свои значения стохастическим образом, не выходя за установленные границы $X_i^{\text{мин}}$ и $X_i^{\text{макс}}$.

Неизменность границ допустимых значений параметров (3.23) обусловлена предположением, что в чертежах отсутствуют грубые ошибки, требующие проведения их изменений, соответственно в процессе производства они не меняются. Отсюда следует вывод: отсутствие комплекта КД или недостаточная её проработанность делает поведение конструкции при функционировании стохастическим с точки зрения наблюдателя, но не с точки зрения логики её поведения. Ограничения (допуски) в конструкции существуют всегда, даже если они по какой-либо причине не определены и не установлены в КД.

Создание изделий с гарантированной надёжностью требует разработки методов конструирования с учётом надёжности, т. е. конструирования, нацеленного на безусловное достижение заданной безотказности. Здесь отметим важный аспект. Использование понятия гарантированной надёжности не означает абсолютной безотказности, а предполагает наличие гарантий непревышения определённого наперёд заданного уровня показателей надёжности.

Если известны все параметры, влияющие на надёжность, и каждый из них по отдельности удовлетворяет условию (3.23), то обобщённый по-

казатель безотказности $P(t)$ изделия также будет находиться в соответствующем диапазоне допусков со стационарными границами

$$P_{\min} \leq P(t) \leq P_{\max}. \quad (3.25)$$

Если известны не все локальные параметры, влияющие на надёжность, то обобщённый параметр безотказности $P(t)$ изделия будет находиться в соответствующем диапазоне допусков со случайными границами

$$P_{\min}(t) \leq P(t) \leq P_{\max}(t). \quad (3.26)$$

Значит, надёжность можно рассматривать, как результат соотношения областей допустимых состояний и работоспособности в целом для конструкции (2.75), так и соотношения областей допустимых состояний и работоспособностей каждого из параметров (2.76) с учётом структурной схемы надёжности. Причём в первом случае практически невозможно управлять надёжностью изделия («неизвестно, за какую ниточку потянуть»), а во втором – возможен индивидуальный учёт влияния параметров конструкции на надёжность.

Кроме того, формула (3.25) соответствует обобщённой параметрической модели надёжности при конструировании, которая построена на исключении недопустимых параметров изделия путём установления конструктивных ограничений. Формула (3.26) соответствует стохастическому поведению системы, часть параметров которой при конструировании не определена или не обоснована.

ГЛАВА 4

КАК СЛЕДУЕТ ПОНИМАТЬ НАДЁЖНОСТЬ

4.1. Философские аспекты надёжности

Для реализации конструкторско-технологических подходов к обеспечению надёжности обратимся к парадигме А.И. Уёмова о триединстве вещей, их свойств и отношений [16] (здесь и далее «вещь» рассматривается как синоним понятий «предмет», «изделие» и «объект»). Согласно указанной парадигме свойства являются одной из философских категорий, тесно связанных друг с другом и переходящих друг в друга – вещей, как отношений свойств; свойств, как отношений вещей; и отношений, как свойств вещей. Взаимосвязь вещей, их свойств и отношений показана на рис. 4.1.

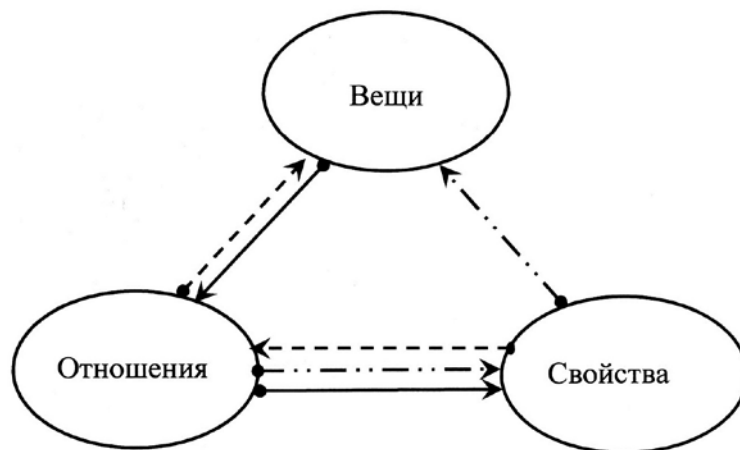


Рис. 4.1. Диаграмма, показывающая взаимосвязь вещей, их свойств и отношений

Любые вещи как совокупность элементов материального мира (атомов, молекул, веществ, предметов, изделий или систем) находятся в непрерывных отношениях взаиморасположения, взаимосвязи и взаимодействия, что проявляется в их свойствах, выражающих такую сторону вещи, которая обуславливает её различие или общность с другими вещами и обнаруживается в её отношении к ним [167]. Свойства относятся исключительно к вещам, выражают те или иные их стороны и не существуют вне отношений вещи к другим вещам. Вещи обладают внутренней структурой в виде совокупности элементов с определённым пространственным расположением

и взаимосвязями: химическими, механическими, геометрическими, кинематическими, жесткостными и пр., что даёт возможность вещам не распадаться, иметь заданные геометрические размеры и формы, функционировать определённым образом и пр., т. е. проявляться в виде тех или иных свойств. В то же время свойства вещей могут изменяться или дополняться, если учитывать не только их внутреннюю структуру, но также условия и процессы взаимодействия между элементами внутри вещей: механику, износ, электрохимическую коррозию, ползучесть, смятие, усталость и пр.

Взаиморасположения, взаимосвязи и взаимодействия элементов внутри вещи определяют **режим эксплуатации**, т. е. те условия, которые присущи вещи независимо от того, наблюдаются какие-либо внешние воздействия либо эти воздействия отсутствуют [168]. Так, для осуществления работы электрореактивных двигателей коррекции орбитального движения КА используется ёмкость для хранения газообразного рабочего тела под высоким давлением, например ксеноновый бак высокого давления [169]. Внутреннее избыточное давление будет параметром, характеризующим режим эксплуатации ёмкости, причём значение внутреннего давления может меняться в результате внешнего теплового воздействия и расхода рабочего тела в процессе работы двигателя, но условие нагружения ёмкости (избыточный характер внутреннего давления) при этом не изменяется. Другим примером режима эксплуатации служит усилие натяжения упругого основания панелей БС полужёсткого типа, на котором размещают и закрепляют ФЭП [170; 171]. В натянутом состоянии упругое основание в виде трикотажного сетеполотна или структуры с продольно-поперечным расположением арамидных струн закрепляют поверх рамы из труб (рис. 4.2), вследствие чего в сечениях труб создаются изгибающие и крутящие моменты, которые действуют постоянно и независимо от внешних нагрузок.

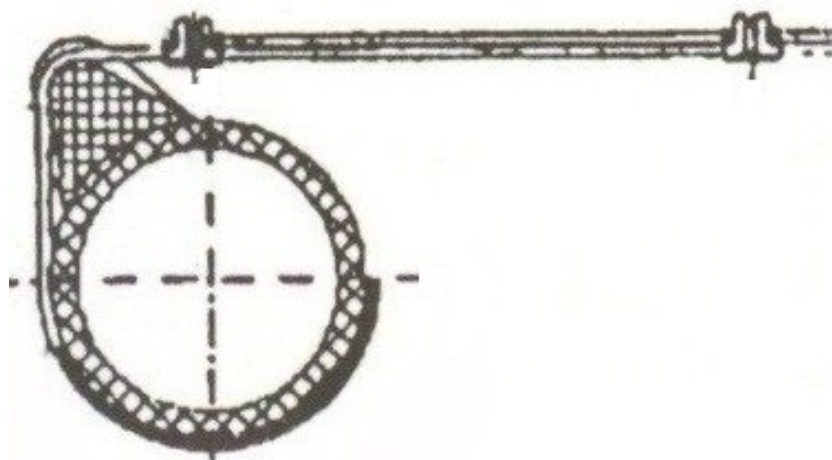


Рис. 4.2. Размещение упругого основания на раме панели БС

Режимы эксплуатации изделий определяет и задаёт конструктор в КД, однако их реализация зачастую зависит от факторов, возникающих в процессе производственной деятельности рабочих. Все действия человека в процессе производства должны быть предусмотрены требованиями технической документации и строго им соответствовать, в этом случае изделие будет работать так, как это задумал конструктор. Для изделий с малой вероятностью отказов риски их возникновения могут представлять любые воздействия человека в процессе производства, не санкционированные КД, ТД и НТД, т. е. те, которые не соответствуют или противоречат их требованиям. В результате воздействия несанкционированных антропогенных факторов в работу изделия могут приноситься изначально не принятые во внимание причины, способные нарушить выполнение предусмотренных конструктором функций, в результате чего поведение изделия может приобретать непредсказуемый характер. Примерами несанкционированных антропогенных факторов служит недозатяжка или перезатяжка предварительно напряжённых элементов конструкции, несанкционированные натяги в сопряжениях деталей, случайное попадание клея в подвижные части механизмов, отсутствие или ненадёжная контровка резьбовых соединений, нарушение порядка проведения сборочных работ и т. п. В результате подобного рода несанкционированных воздействий человека могут возникать отказы. Например, установка датчиков угловых скоростей с грубыми отступлениями от требований КД привела 02.06.2013 к аварии на старте РН «Протон-М» с тремя спутниками «Глонасс» [172]. Воздействие несанкционированных антропогенных факторов может осуществляться при сборочных операциях, настройках, регулировках, монтажных, такелажных и регламентных работах, в том числе при операциях по подготовке КА к полёту. Опасность воздействия несанкционированных антропогенных факторов усугубляется их спорадичностью, что требует повышенного внимания и контроля за действиями людей при работе с техническими объектами. Для снижения рисков воздействия этих факторов все контакты людей с объектами должны быть строго регламентированы, а результаты таких воздействий обязаны быть под контролем специально подготовленного персонала служб технического контроля и заказчика с применением органолептических и технических средств контроля. При выполнении особо ответственных операций необходимо применять так называемую «защиту от дурака», делающую невозможными очевидно неверные действия человека при изготовлении, сборке, монтаже и обслуживании изделий.

Поскольку вещи не существуют изолированно от других вещей и внешней среды, то, исходя из единства принципов построения материального мира, свойства, проявленные во взаиморасположении, взаимосвя-

зи и взаимодействии элементов внутри какой-либо вещи, подобным же образом проявляются во взаиморасположении, взаимосвязи и взаимодействии с другими вещами и внешней средой. Причём отношение некой вещи Θ с внешней средой в течение периода времени $t \in [t_1, t_2]$ можно рассматривать как отношение этой вещи с другой вещью, действие которой эквивалентно воздействию внешней среды. Это будет прямым следствием того, что за указанный промежуток времени во внешней среде неизбежно происходят физико-химические процессы, воздействующие на вещь Θ , из-за чего свойства этой вещи в конце периода времени t_2 обнаружатся как результат влияния внешней среды наподобие некой другой вещи, т. е. проявятся по-иному, чем в начальный момент времени t_1 .

Взаиморасположения, взаимосвязи и взаимодействия вещи с другими вещами и внешней средой определяют **условия эксплуатации** как результат воздействия внешних факторов – *«явлений, процессов или среды, внешних по отношению к изделию или его СЧ, которые вызывают или могут вызвать ограничение или потерю работоспособного состояния изделия в процессе эксплуатации»* [173]. В качестве условий эксплуатации для автоматических КА выступают факторы воздействия природной и техногенной сред, а для пилотируемых КА в качестве внешних факторов могут дополнительно выступать антропогенные факторы во время осуществления внутрикорабельной и внекорабельной деятельности.

Факторы природной среды – это все факторы, которые не связаны напрямую с объектами техносферы в процессе изготовления, при наземной эксплуатации, полёте в составе РН, а также при штатной эксплуатации КА в космическом пространстве. Диапазон факторов природной среды для КА варьируется в широких пределах – от параметров атмосферы Земли до глубокого вакуума, от гравитации до невесомости, характеризуется резким падением давления при полёте РН, экспоненциальным изменением полей температур в космическом пространстве, жёстким радиационным излучением и пр. Факторы природной среды хорошо поддаются изучению – измерениям и исследованиям, а для оценки их воздействия существует широкий арсенал технических средств: математическое моделирование, компьютерная симуляция, расчёты, наземные и натурные испытания [174].

Факторы техногенной среды воздействуют со стороны техногенных объектов, внешних по отношению к КА, и/или порождаются ими при наземной эксплуатации, транспортировании автомобильным, железнодорожным или воздушным транспортом, в полёте в составе РН и на орбитальном участке. Например, во время полёта на активном участке космический аппарат консольно закреплён на ракете-носителе и находится внутри ГО, который предохраняет полезную нагрузку от набегающего воздушного потока в плотных слоях атмосферы. В таком состоянии КА имеет контактное

взаимодействие по стыку с РН и бесконтактное взаимодействие с головным обтекателем через внутреннюю воздушную среду. Воздействие на КА осуществляется путём передачи вибрационных нагрузок от работающей двигательной установки по конструкциям и узлам РН, а также акустическим излучением от обшивки ГО.

Уровень техногенного нагружения космического аппарата принято определять перегрузками в направлении оси \vec{l} [175]:

- при расчёте квазистатических нагрузок и прочности

$$n_l = \frac{1}{g}(a_l - g_l),$$

где a_l , g_l – проекции ускорений движения тела \vec{a} и свободного падения \vec{g} на ось \vec{l} ;

- при нормировании вибрационных режимов и анализе вибропрочности

$$n_l^b = \frac{a_l}{g},$$

где индекс b обозначает, что рассматривается вибрационный (динамический) процесс.

Для каждого типа РН номенклатура и уровни воздействия на КА нормируются, как, например, для РН «Протон» [176].

Режимы и условия эксплуатации в своей совокупности обнаруживаются как некий суммарный результат, отличный от свойств вещей по отдельности, т. е. их свойства проявляются по-иному, чем сами по себе. Пример подобного рода суммирования режимов работы и условий эксплуатации – **принцип суперпозиции** (принцип независимости действия и сложения сил) [177], широко используемый в механике твёрдого деформируемого тела. В случае применения панелей БС полужёсткого типа, НДС рам под действием изгибающих и крутящих моментов от натянутого сетеполотна или струн (режимов эксплуатации) необходимо суммировать в соответствии с принципом суперпозиции с НДС от действия внешних нагрузок (перегрузок) активного участка полёта (условий эксплуатации в виде факторов техногенной среды). В случае использования на КА ёмкости с внутренним избыточным давлением (режимом эксплуатации), изменение режима её эксплуатации определяется падением внешнего давления и повышением/понижением температуры внешней среды (условиями эксплуатации в виде факторов природной среды). В результате внутреннее давление в ёмкости с учётом закона Шарля (второго закона Гей-Люссака) будет определяться формулой

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

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 РН.

Таким образом, свойства всегда двойко обусловлены: внутренним содержанием вещи как совокупности взаиморасположения, взаимосвязей и взаимодействий составляющих её элементов (режимами эксплуатации) и отношениями с окружающими вещами и средой (условиями эксплуатации).

Проявляясь в отношениях вещей, свойства по отношению друг к другу всегда структурированы иерархическим порядком. Любая вещь выступает как отношение совокупности свойств, каждое из которых выражает данную вещь как единую часть целого с определённой стороны. Например, цвет выражает вещь со стороны зрительного восприятия её электромагнитного излучения в оптическом диапазоне, а эстетичность – со стороны чувственного восприятия всего изделия в целом с точки зрения его внешнего вида. При этом отношение свойств, представляющих собой вещь, можно рассматривать как систему находящихся в иерархических отношениях простых и существенных свойств. Совокупность простых свойств группируется вокруг устойчивого целостного единства вещи – существенного свойства, отображающего какую-либо значимую сторону вещи. Например, сам по себе цвет – это простое свойство, а совокупное сочетание цветов и оттенков, композиции и стиля нанесённых рисунков и шрифтов, пропорций предмета, контуров обвода и пр. – это уже существенное свойство, отображающее эстетическую сторону вещи [178]. В свою очередь совокупность простых и существенных свойств вещи образуют главное существенное свойство – качество, которое определяет специфику вещи, выделяющую её из всех других вещей. Иерархическая структура свойств качества представлена на рис. 4.3.

Качество как философская категория – это свойство, выражающее вещь со стороны её целостного единства. Качество является границей вещи, с исчезновением качества данная вещь превращается в другую вещь. Например, любой автомобиль есть самодвижущаяся машина, управляемая человеком, и перестаёт им быть, после того как его ремонт становится невозможен (например после аварии) или нецелесообразен (например после морального старения или физического износа). В этой связи важно не путать качество как философскую категорию и как потребительскую цен-

ность продукции. Например, «Жигули» и «Мерседес» с позиций качества продукции – это разные автомобили, но только лишь в потребительском восприятии человека, поскольку от этого они не перестают быть автомобилями с позиций философских категорий до полной утраты способности к передвижению в качестве автомобилей.

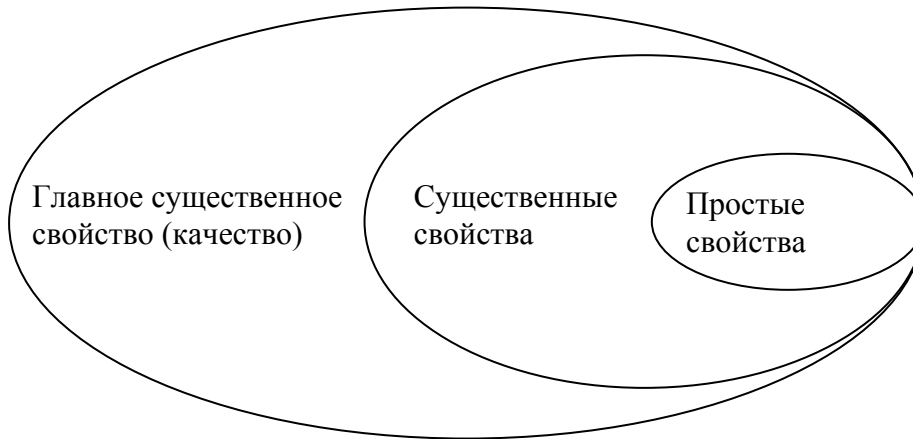


Рис. 4.3. Иерархическая структура свойств качества

Различие между качеством и остальными свойствами в том, что без тех или иных простых или существенных свойств вещь с незначительным ущербом может выполнить своё служебное назначение, а исчезновение главного существенного свойства превращает одну вещь в другую, с другим качеством, не позволяющим выполнить задачу, для решения которой эта вещь изначально была создана. Например, непокрашенная ракета не будет препятствовать выполнению целевой задачи – выводу на околоземную орбиту КА, более того, отсутствие краски, к примеру на РН «Протон», приводит к снижению стартовой массы примерно на 300 кг, что позволяет при необходимости вывести на орбиту дополнительную полезную нагрузку. Однако отказ ракетного двигателя лишает РН её главного свойства – осуществлять контролируемое движение по заданной траектории, в результате чего ракета превращается в неуправляемый летательный объект либо в случае взрыва – во множество фрагментов, движущихся по нерасчётной баллистической траектории.

Таким образом, качество в парадигме А.И. Уёмова является главным существенным свойством, выражающим отношение вещи с другими вещами или средой с позиций единого целого в пределах строго определённых границ, выход за пределы которых приводит к нарушению выполнения вещью своего служебного назначения, превращая вещь в другую вещь. Учитывая, что любые свойства могут быть различены качественно и определены количественно с помощью конкретных физических величин – па-

раметров [179], качество вещи в общем случае можно представить выражением

$$X^{\min} \leq X \leq X^{\max}, \quad (4.1)$$

где X – некий обобщённый параметр качества; X^{\min} , X^{\max} – нижняя и верхняя границы допустимого изменения обобщённого параметра качества.

Поскольку вещь определяется отношением свойств, которые в совокупности можно рассматривать как систему или множество подсистем свойств качества, где локальные или обобщённые параметры свойств качества не могут выходить за пределы заданных границ, то обобщённый параметр качества X (4.1) можно представить множеством

$$X = \left\{ X_i \mid X_i^{\min} \leq X_i \leq X_i^{\max} \right\}, \quad (4.2)$$

где X_i – локальные и (или) обобщённые параметры, определяющие простые и (или) существенные свойства качества.

Выражения (4.1)–(4.2) по своей структуре совпадают с выражением действительных значений параметров, задаваемых в чертежах номинальными величинами и полями допусков (3.22). Причём номинальные значения параметров выбирают исходя из требований ТЗ на разработку, рекомендаций НТД, следования общетехническим и специальным правилам проектирования, соблюдения алгоритмов и процедур при функционировании, а границы изменения параметров определяют увязками требований проекта, закономерностями выбранных конструктивно-компоновочных и конструктивно-силовых схем, применением тех или иных видов резервирования для расширения диапазонов функционирования, технологическими возможностями производства и т. п.

Согласно своему смысловому содержанию (неизменность, постоянство, достоверность, доверительность – то, что не подведёт, на что длительное время можно положиться) надёжность выражает вещь со стороны сохранения её стабильности, т. е. неизменчивости во времени. По своей сущности надёжность является одним из свойств вещей, связанным исключительно со временем, т. е. описывающих в течение времени допустимые изменения отношений вещей: взаиморасположение, взаимосвязь и взаимодействие. Важно понимать, что надёжностью можно характеризовать не только свойства, традиционно связываемые с кинетикой накопления повреждений при нагружении и с деградацией характеристик материалов, но и свойства, характеризующие вероятностные процессы, которые обычно считаются независимыми от времени, например разбросы геометрических размеров при изготовлении деталей. Если при изготовлении единичного изделия использовалась конструкторская и технологическая документация, которая была разработана в соответствии с требованиями

ЕСКД и ЕСТД, то такое изделие гипотетически может быть воспроизведено множество раз, несмотря на то, что по социально-экономическим соображениям этого и не требуется. Таким образом само допущение о возможности неограниченного производства однородных изделий предполагает частотный характер параметров состояния изделий, которые гипотетически могут быть осуществлены и развёрнуты во времени. Число реальных или гипотетических воспроизведений однородных изделий τ , при котором оно способно обеспечить безотказность, есть случайная величина, и по смыслу не может быть ничем иным, как временем безотказной работы изделия t , выраженным в числе воспроизведений, пусть даже теоретически возможным.

Исходя из сказанного, любое из свойств иерархической структуры качества (рис. 4.3), включая само качество как главное существенное свойство, должно проявляться со стороны сохранения своей стабильности во времени и характеризоваться надёжностью. По сути надёжность не существует сама по себе – это характеристика чего-то уже имеющегося на материальном уровне, что должно показать свою стабильность во времени, другими словами, свойство сохранять качество во времени, которое можно выразить количественно через функцию обобщённого параметра качества $X(\tau)$. Похожим образом связь качества и надёжности была определена Б.В. Гнеденко, Ю.К. Беляевым и Л.Д. Соловьевым ещё в 1965 г.: «*Под надёжностью изделия мы будем понимать способность изделия сохранять качество при определённых условиях эксплуатации. Другими словами, надёжность – это качество, развёрнутое во времени*» [180], и в последствии в том или ином виде многократно повторялась. Например, «*надёжность является одним из зависящих от времени аспектов качества*» [181]. Надёжность призвана характеризовать стабильность качества изделий в последовательных состояниях, разворачиваемых во времени. Взаимосвязь свойств качества с надёжностью показана на рис. 4.4.

Поскольку границы качества должны оставаться неизменными во времени (иначе вещь приобретёт иное качество и станет другой вещью), то обобщённый параметр качества обязан изменяться во времени в определённых границах вследствие изменения взаиморасположений, взаимосвязей и взаимодействий элементов внутри вещи, между вещами и вещью с внешней средой, значит, выражение для надёжности напрямую следует из (4.1):

$$X^{\min} \leq X(\tau) \leq X^{\max}; \tau \in [t_1, t_2], \quad (4.3)$$

где $X(\tau)$ – обобщённый параметр качества, изменяющийся во времени, который не должен выходить за границы допустимых изменений качества.

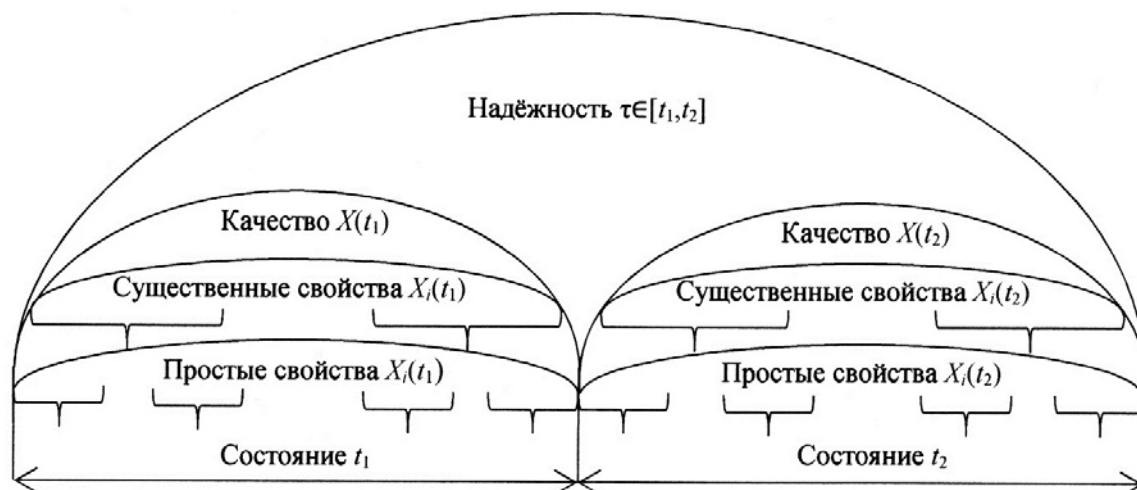


Рис. 4.4. Взаимосвязь свойств качества с надёжностью

Если качество – это главное свойство вещей, которое образуется иерархической совокупностью простых и существенных свойств, то надёжность можно рассматривать как свойство сохранять стабильность в виде «отсутствия особых причин изменчивости» [182] простых и существенных свойств вещей. Причём чем меньше допустимый диапазон изменения значений параметра в выражении (4.3), тем свойство более стабильно, а вещь обладает большей надёжностью. По аналогии, безотказность – это свойство непрерывно сохранять качество во времени или свойство непрерывно сохранять стабильность простых и существенных свойств вещей [178]. Таким образом, выражение (4.3) может быть преобразовано к виду

$$X(\tau) = \left\{ X_i(\tau) \mid X_i^{\min} \leq X_i(\tau) \leq X_i^{\max}; \tau \in [t_1, t_2] \right\}, \quad (4.4)$$

где $X_i(\tau)$ – локальные и (или) обобщённые параметры, определяющие простые и (или) существенные свойства качества в течение наработки.

Выражения (4.3)–(4.4) по своей структуре совпадают с выражением, описывающим возможные вариации действительных значений параметров внутри поля допусков в процессе изготовления партии изделий (3.23). Также нетрудно заметить, что допустимые границы локальных и (или) обобщённых параметров качества в выражениях (4.1)–(4.4) определяют область работоспособного состояния изделия G (2.76), а изменения во времени параметров качества $X(\tau)$ внутри этой области определяет область его допустимых состояний (2.68).

С помощью выражений (4.3)–(4.4) можно исследовать надёжность, выражая её через обобщённый параметр, характеризующий вещь со стороны её целостного единства (качества), как это делается с применением вероятностно-статистических методов теории надёжности, либо выражая на-

дёжность с помощью множества параметров качества, каждый из которых характеризует вещь как единую часть целого с определенной стороны. В последнем случае обобщённый параметр надёжности, характеризующий вещь со стороны её целостного единства, может быть получен путём «складывания» параметров, характеризующих каждую из частей целого, **методом структурной схемы надёжности** [183].

Из выражения (4.4) следует, что надёжность, с одной стороны, создаёт качество как составная его часть – существенное свойство, делая уровень качества достижимым, а с другой – выражает достигнутое качество как единое целое со стороны его сохранения во времени (4.3).

Связь качества (4.2) и надёжности (4.4) может быть определена выражением

$$X = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} X(\tau + \Delta \tau).$$

Графически связь между качеством и надёжностью в момент времени $\tau = t_1$ приведена на рис. 4.5. Из графика видно, что качество выражает функцию, которая может быть прервана без последствий в любой момент времени (например $\tau = t_1$), а вот надёжность является функцией, которая не может быть прервана в течение заданного периода времени.

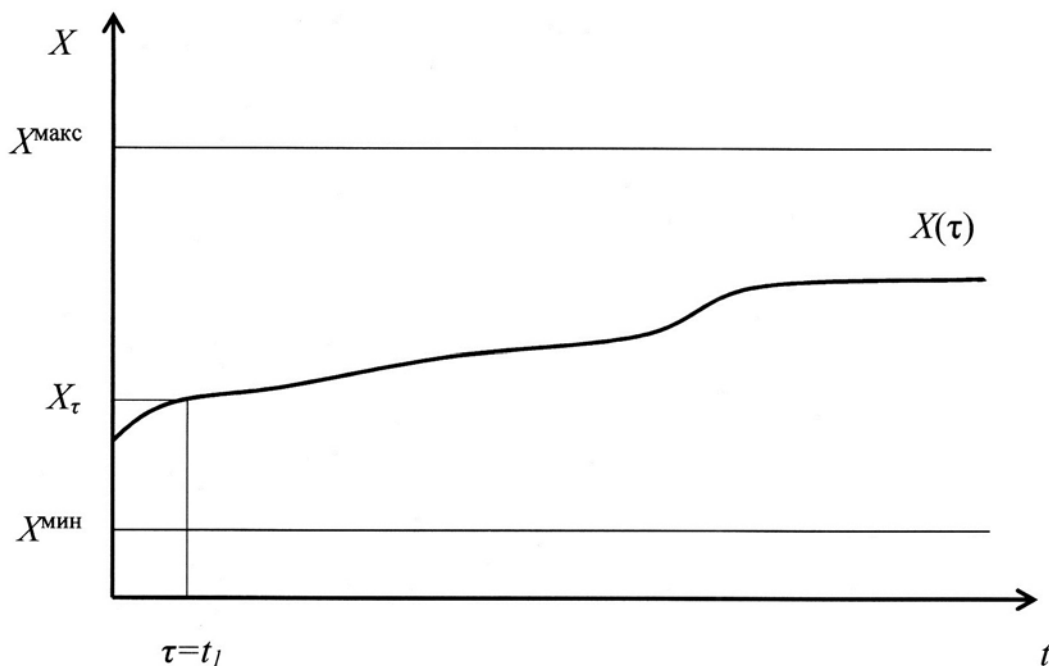


Рис. 4.5. Графическая иллюстрация связи качества и надёжности

Исходя из (4.4) надёжность может выражать стабильность сохранения во времени любой из сторон изделия, например как функционирования по выполнению служебного назначения, так и эстетического восприятия внеш-

него вида. На практике добиваются того, чтобы была достигнута заданная надёжность по обеспечению функционирования изделия согласно своему служебному назначению – той задачи, для решения которой оно и создаётся. При этом очевидно, что дефекты, связанные с эстетическим восприятием, которые отражаются лишь на внешнем виде изделия (царапины, сколы, заусенцы, цвета побежалости, непрокрасы и пр.) наверняка не приведут к нарушению функций по выполнению служебного назначения.

При этом необходимо разделять такие функции объекта, как *«выполнение в объекте процесса, соответствующего его назначению, проявление заданного условия или свойства объекта согласно требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации»* [184], на основные и вспомогательные. Под основной функцией понимается *«функция или совокупность функций объекта, выполнение которых рассматривается как необходимое условие соответствия объекта его назначению»*, а под вспомогательными – *«функции, невыполнение которых не нарушает соответствия объекта его назначению»* [184]. Например, когда для контроля начальных и конечных положений конструкций при раскрытии требуется использовать датчики телеметрического контроля, надёжность МУ ОС определяется исходя из выполнения основных функций – раскрытия конструкций в рабочее положение. Обеспечение работоспособности датчиков телеметрического контроля является вспомогательной функцией, служащей для информационного сопровождения процесса раскрытия, при этом отказы телеметрических датчиков на процесс раскрытия не влияют, если, конечно (в случае обоснованной необходимости), их сигналы не предполагается использовать для формирования управляющих команд на каком-либо из этапов раскрытия.

На основании того, что не все дефекты могут вызывать отказы при выполнении основных функций, в НТД принято различать исправное (бездефектное) и работоспособное состояния изделия [82], при котором дефекты не влияют на функционирование изделия по выполнению служебного назначения. Именно по этой причине надёжность чаще всего понимается в узком смысле: сохранение во времени работоспособного состояния при выполнении основных функций. Другими словами, надёжность на практике принято считать существенным свойством, характеризующим способность изделия совершать требуемую работу при выполнении основной функции с присущими ему свойствами и отношениями.

Рассматривая надёжность как сохранение работоспособного состояния во времени, изделие можно представить как подсистему свойств качества (2.79), обеспечивающих его функционирование по служебному назначению. При этом выражение (4.4) не меняет своего физического смысла, ограничивая лишь рассмотрение тех параметров свойств качества, которые

определяют работоспособное состояние изделия во времени. Это состояние изделия в общем случае может быть определено n -параметрами, характеризующими способность выполнять требуемые функции, а надёжность сохранения во времени качества изделия в целом может определяться одним показателем надёжности, например ВБР. Если в приведённом примере поворота штанги (см. рис. 2.3) условие сохранения прочности (2.21) определяет свойство обеспечивать конструкционную прочность штанги от нагрузок в сложенном положении, условие превышения движущего момента над моментом сил сопротивления (2.24) – свойство энергодостаточности приводов для поворота штанги на полный угол разворота, а условие сохранения радиального зазора в шарнире (2.60) – свойство обеспечивать свободу вращения шарнира в любом угловом положении штанги при раскрытии, то параметрическая надёжность может быть определена по трём указанным параметрам с помощью (2.80)–(2.85) и представлена обобщённым показателем (2.86).

Для изделий, относящихся к 0–2 классам надёжности (класс надёжности определяется по числу девяток после запятой) [12], вычисление надёжности с помощью (2.80)–(2.86) может иметь вполне приемлемую точность, по сравнению с которой риски отказов будут ничтожными. Но для изделий 3–5 классов надёжности риски отказов из-за неучтённых свойств, влияющих на безотказность, могут превысить допустимый уровень. Это следует из известной формулы полной вероятности:

$$P(t) + Q(t) = 1, \quad (4.5)$$

здесь $P(t) = \text{Вер}(\tau > t)$; $Q(t) = \text{Вер}(\tau < t)$;

где $P(t)$ – функция надёжности (ВБР); $Q(t)$ – функция отказа (вероятность отказа); τ – наработка до отказа.

Согласно (4.5) любое работоспособное изделие одновременно может быть и отказоспособным. Наиболее очевидная причина отказоспособности – использование изделий в условиях и режимах эксплуатации, которые для этого не предусмотрены. Например, объект с подтвержденной работоспособностью в тропическом климате наверняка будет неработоспособным на Крайнем Севере. Менее очевидные причины отказоспособности кроются в необоснованном выборе материалов, назначении неоправданных режимов работы, нестабильности технологических операций, осуществлении человеком непреднамеренных неверных действий и т. п.

Существует также терминологическая причина, по которой вполне работоспособное изделие может проявлять свою отказоспособность, – это нечёткость понимания и определения термина «работоспособное состояние». В наиболее распространённой трактовке работоспособность понимается согласно определению, приведённому в ГОСТ 27.002–89, как реле-

вантность параметров конструкции требования НТД и/или КД [82]. Однако процедуры и критерии установления необходимого и достаточного объёма требований для обеспечения работоспособного состояния изделий в нормативной документации не определены, хотя совершенно очевидно, что отсутствие любого из требований в НТД и/или КД может привести к недооценке работоспособности, а это неприемлемо при разработке изделий с малой вероятностью отказов. Например, исследованием производственных причин отказов было установлено, что от 5,0 до 16 % отказов от суммы отказов, вызваны явлениями, не учтёнными и не регламентированными требованиями КД и ТД [185].

Значит, для изделий с малой вероятностью отказов необходимо проводить процедуру валидации требований КД, без чего невозможно утверждать, что все требования были установлены так, как должно, при расчётах учтены все параметры или расчётно-экспериментальное обеспечение проведено надлежащим образом. Если добавить сюда, что наземные испытания производятся на единичных изделиях из случайной выборки (со случайным конструктивным исполнением), то понятно, что при неблагоприятном сочетании факторов вроде бы работоспособное изделие вполне может оказаться отказоспособным.

Решения задач по обеспечению надёжности для изделий 0–2 и 3–5 классов надёжности исходя из (4.5) несут разную смысловую нагрузку и преследуют разные цели. В первом случае бывает достаточно обеспечить работоспособность изделия известными расчётно-экспериментальными методами [15; 28; 90], а во втором – необходимо доказать, что требуемая отказоспособность достигнута и/или устранить её причины. Следствием неустранения причин отказоспособности изделий на стадии выпуска КД является то, что при проведении НЭО без обеспечения необходимой генеральной совокупности нельзя быть уверенным в достижении заданной надёжности или, иными словами, в способности изделия к отказам с допустимым риском. Например, согласно формуле

$$P = (1 - p)^{1/n},$$

для подтверждения безотказности изделия одноразового срабатывания выше P с доверительной вероятностью p необходимо провести минимум n независимых однородных испытаний, т. е. для изделий с малой вероятностью отказов, изготавливаемых в условиях единичного или мелкосерийного производства, экспериментальное подтверждение надёжности может оказаться экономически бессмысленной задачей.

Таким образом, расчётно-экспериментальное подтверждение работоспособности на соответствие требованиям КД и даже наличие истории успеха при штатном использовании не исключают способности изделий

к отказам. Подтверждением тому служат однотипные отказы при раскрытии панелей БС на серийных космических кораблях «Союз ТМА-14М» и «Союз ТМА-17М» (см. табл. 2.1). Механизм возникновения отказоспособности изделий можно пояснить следующим примером. Предположим, что в ТЗ на разработку штанги (см. рис. 2.3) задана ВБР $P(t) > 0,999\ 5$, причём заданный показатель надёжности был подтверждён в результате проведения установленных стандартом предприятия расчётно-экспериментальных работ, а штанга имеет лётную квалификацию. Однако в результате проведения сторонней (независимой) экспертизы была обнаружена возможность вероятного разрушения замка зачековки штанги, обеспечивающего концепцию «сквозного удержания», из-за нестабильности положения мест приложения нагрузок к элементам замка в процессе силовой затяжки [17]. Выявлено, что при проведении технологических операций по зачековке замка существует вероятность смещения точек силового контакта деталей вследствие их относительного проворота. В результате этого вместо изгиба, учтённого при расчётах, в одной из силовых деталей появляется возможность возникновения изгиба с кручением из-за плоскопараллельного смещения силы, вызывающей изгиб, относительно одной из главных осей сечения. При этом риск возникновения разрушения элементов конструкции замка из-за флуктуации точек силового контакта был оценен на уровне не менее 10^{-3} , что превышает заданную вероятность отказов из-за того, что в первоначальных расчётах не были проанализированы свойства деталей замка, связанные с изменениями положения точек силового контакта при проведении технологических операций по силовой затяжке. Для снижения риска возникновения отказов до приемлемого уровня, например не ниже 10^{-4} , в конструкции силового узла необходимо либо исключить конструктивными способами нестабильность взаимного расположения деталей при силовой затяжке (обеспечить свойство деталей не изменять своего взаиморасположения) либо изменить сечение силового узла до выполнения условия прочности (2.21) с учётом совместного изгиба и кручения, вызванного возможными предельными отклонениями точек силового контакта в сопряжении деталей (обеспечить свойство прочности деталей при изменении силового взаимодействия в пределах разбросов точек сопряжения).

Параметрическое описание изделий с малой вероятностью отказов следует производить только на основе системного анализа свойств, способных проявлять свою нестабильность во времени при функционировании по служебному назначению. Как показывает практика [17–21; 186], при системном анализе может быть выявлено значительно больше опасных с позиции надёжности свойств КЭ, чем в приведённом примере поворотной штанги (см. рис. 2.3) при определении областей её состояний (2.80)

и работоспособности (2.81). В частности, для обеспечения надёжности поворота штанги требуется дополнительно учитывать, как минимум, такие свойства:

1) обеспечивать инициирование процесса раскрытия штанги в заданный момент времени, которое соответствует условию срабатывания пироприборов;

2) обеспечивать снятие механических связей штанги с опорным основанием в заданный момент времени, которое соответствует условию освобождения замка зачехления штанги;

3) преодолевать трение покоя в шарнире штанги при начальном старте, которое соответствует условию обеспечения начала движения штанги;

4) обеспечивать беспрепятственное движение штанги по заданной траектории, которое соответствует условию отсутствия на пути движения искусственных препятствий, помех (неучтённых сопротивлений) движению или возможностей зацепления за смежные конструкции;

5) обеспечивать конструкционную прочность штанги при фиксации в конечном положении, которое соответствует условию прочности при фиксации штанги в рабочее положение [5].

Подчеркнём, что перечисленные выше свойства, влияющие на надёжность поворота штанги (см. рис. 2.3), есть основные, наиболее характерные проявления требуемых условий (функций), причём в рассматриваемом случае их число сознательно ограничено из соображений минимальной необходимости для последующих выводов. Однако приведённого примера достаточно, чтобы убедиться: не все свойства штанги могут быть количественно выражены через параметры, как, например, свойство обеспечивать беспрепятственное движение штанги по заданной траектории. Между тем именно отсутствие этого свойства во время полёта космического корабля «Союз-1» в 1967 г. привело к нераскрытию левой панели БС, что повлекло за собой цепочку катастрофических отказов бортовых систем и в конечном счёте решение Госкомиссии об аварийном спуске корабля с орбиты [187]. Как позже выяснилось, при разработке космического корабля не была учтена вероятность нарушения функции беспрепятственного поворота панели БС вследствие способности матов экранно-вакуумной теплоизоляции «раздуться» в невесомости до пределов ограничения свободы своих перемещений, что создало препятствие на пути движения панели и затем послужило причиной её зацепления и нераскрытия (см. табл. 2.1).

В случае невозможности определения свойств через параметры возникает противоречие параметрического и функционального определений надёжности [140], приведённых в ГОСТ 27.002 [82; 83]:

- параметрическое описание отказа штанги невозможно, поскольку в ней самой не существует внутренних свойств, зависящих от состояния её конструкций в момент отказа;
- отказ возникает при выполнении функций штанги независимо от внутренних свойств штанги в результате взаимодействия с внешними препятствиями на пути её движения.

Следствием указанного противоречия является невозможность составления согласованных множеств (2.77), характеризующих надёжность (4.4) через параметры, и, как результат, невозможность вычисления обобщённого параметра надёжности (4.3) с требуемой точностью.

4.2. Особенности количественного определения надёжности при параметрическом подходе

Противоречие между параметрическим и функциональным подходами к надёжности может быть преодолено, если свойство обеспечивать беспрепятственное движение поворотной конструкции по заданной траектории определить вероятностью совершения событий, учитывающих одновременно проявление внутренних свойств объекта и его взаимодействия с внешними конструкциями и средой. В этом случае совершение события A , обуславливающего выполнение основной функции – поворота конструкций в рабочее положение, может характеризоваться одним из показателей надёжности [82; 188] – ВБР, а выполнение функции по изменению промежуточного состояния t_4 при функционировании (см. рис. 2.1) – может быть определено вероятностью как степенью уверенности в совершении события A_4 , обуславливающего переход конструкции из одного состояния в другое. При этом ВБР при повороте конструкции в рабочее положение связана с вероятностью выполнения функции по изменению промежуточного состояния t_4 – условной вероятностью как вероятностью совершения события A , если это событие A_4 уже произошло:

$$P(t) = P(A|A_4). \quad (4.6)$$

Значит, фактор, обеспечивающий работоспособность, который «невозможно» характеризовать параметром, может быть охарактеризован вероятностью, которая полностью определяет выполнение функции по изменению промежуточного состояния при функционировании и в конечном счёте выполнение целевой функции раскрытия конструкции в рабочее положение. Такой подход полностью соответствует отмеченной ранее непрерывности отношений в виде взаиморасположений, взаимосвязей и взаимо-

действий внутри вещи, вещи с другими вещами и с внешней средой (см. п. 4.1).

Как известно, любое свойство объектов может быть различимо качественно и определено количественно, при этом количественная информация может быть измерена, а качественная информации измерению не подлежит, но она может быть оценена [189].

Для каждого из свойств выходные параметры в процессе функционирования (согласно рис. 4.5) должны находиться в установленных пределах [190]:

$$X(t) \in [X^{\min}, X^{\max}]. \quad (4.7)$$

Как следует из диаграммы состояний МУ ОС при функционировании (см. рис. 2.1), каждому i -му событию в процессе функционирования, если его невозможно определить параметрами, может быть поставлено в соответствие определённое число, называемое его вероятностью и являющееся мерой возможного совершения данного события, при этом нельзя измерить вероятность техническими средствами, но можно оценить достоверность совершения этого события в заданных пределах от 0 до 1:

$$P_i(t) \in [0, 1]. \quad (4.8)$$

Вероятность есть универсальный показатель, обобщающий некие данные, по которым можно судить о совершении события, проявления свойства, процесса или явления.

Для объектов, работоспособность которых характеризуется по типу «да–нет», i -е свойство выполнять требуемые функции также может быть определено вероятностью сохранения во времени характеристик «да» или «нет»:

$$P_i(t) \in \{[1, 1] \vee [0, 0]\}. \quad (4.9)$$

Вероятность «выполнения требуемых функций» изделия в целом, согласно функциональному определению надёжности [140], в произвольный момент времени можно выразить формулой (4.5), исходя из которой следует, что надёжность объекта в течение времени наработки $0 \leq \tau \leq t$ может изменяться в границах нестрогого двойного неравенства

$$1 - Q_{\max} \leq P(t) \leq 1, \quad (4.10)$$

где Q_{\max} – максимальное значение вероятности отказов.

Выражение (4.10) можно преобразовать к виду, близкому по форме записи (4.7):

$$P(t) \in [P_{\min}, 1], \quad (4.11)$$

здесь $P_{\min} = 1 - Q_{\max}$.

Очевидно, что параметрическое и функциональное определения надёжности [140] приводят к выводу о непрерывности сохранения в установленных пределах во времени значений не только выходных параметров надёжности (4.7), но и её выходных показателей (4.11). Неучёт каких-либо параметров или ошибки в определении их предельных значений неизбежно влекут за собой неопределённость предельных значений выходных показателей надёжности, что приводит к рискам возникновения отказов. Например, неучёт события A_4 в формуле (4.6) влечёт за собой невыполнение условия (4.11). Поэтому выходные показатели надёжности могут достоверно находиться в установленных пределах только в тех случаях, когда параметрическое описание включает «в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность системы выполнять требуемые функции» [82], в том числе показатели, характеризующие способность системы выполнять требуемые функции. В этом случае параметрический и функциональный подходы к надёжности пересекаются.



Гипотеза о пересечении параметрического и функционального подходов к надёжности: если все параметры, характеризующие способность изделия выполнять требуемые функции, непрерывно сохраняют свои значения во времени в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования, то обобщенный показатель надёжности этого изделия также непрерывно сохраняет свои значения во времени в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования

В рамках гипотезы о пересечении параметрического и функционального подходов к надёжности пробелы в параметрическом описании изделия при функционировании недопустимы, а следовательно, выполнение функции по изменению промежуточных состояний панелей БС при функционировании в приведённом выше примере отказа на «Союзе-1» должно было быть непременно учтено в параметрическом описании.

Параметрическое описание изделий с учётом (4.7)–(4.9) и (4.11) можно представить множеством параметров $X_i(t) \in G_1$ и показателей $P_i(t) = X_i(t) \forall X_i(t) \notin G_1$, значения которых удовлетворяют условию нахождения $X_i(t)$ в области установленных работоспособных состояний G (знак функциональной зависимости от времени t здесь и далее опущен):

$$G = \left\{ X_i \mid X_i \in \left[X_i^{\min}, X_i^{\max} \right] \right\} \forall i = (\overline{1, n}). \quad (4.12)$$

Например, когда $n \rightarrow \infty$, то из (4.12) следует доказательство гипотезы о пересечении параметрического и функционального подходов к надёжности:

$$\because \{X_i\} \subseteq G \therefore P_i = P[X_i^{\min} \leq X_i \leq X_i^{\max}] \Rightarrow P = P[X_i \in G], \quad (4.13)$$

где $P[\cdot]$ – вероятность случайного события, описание которого дано в квадратных скобках.

Доказательство (4.13) позволяет создавать параметрическое описание, используя для этого множество, безразлично состоящее из параметров или показателей элементов изделия $X_i(\tau)$ (4.4). При этом в предельном случае параметрическое описание может состоять только из одного обобщённого показателя надёжности $X(\tau)$ (4.3), который характеризует «способность к выполнению требуемых функций» изделия в целом. Таким образом, составление параметрического описания изделий с использованием параметров и показателей позволяет гармонизировать параметрический и функциональный подход к надёжности, при котором параметрическая и функциональная надёжность выступают частями единого целого.

Использование гипотезы о пересечении параметрического и функционального подходов к надёжности требует строгого разделения смысловых понятий «параметр» и «показатель». В терминологии надёжности такого разделения понятий не существует:

- ГОСТ 27.002–89 относит к параметрам, характеризующим способность выполнять требуемые функции, в одинаковой мере показатели (показатели конструкционной прочности, показатели точности функционирования и т. п.) и параметры (кинематические и динамические параметры, скорости и т. п.) [82];

- основоположник параметрической надёжности А.С. Проников относит к параметрическим показателям механические и прочностные характеристики, мощность, точность функционирования, силу тяги, наибольшую скорость, производительность, коэффициент полезного действия, уровень шума, давление, расход топлива и т. п. [12];

- по общепринятой практике надёжность объектов *«количественно оценивают с помощью показателей, которые выбирают и определяют с учётом особенностей объекта, режимов и условий его эксплуатации и последствий отказов»* [191].

В терминологии сбережения материальных и энергетических ресурсов [192] термин «показатель» определяется как *«величина или величины, позволяющие судить о состоянии объекта»*. При этом показатели подразделяются следующим образом:

- единичные и групповые;
- аналитические, прогнозные, плановые, отчетные, статистические;
- технические, экономические, экологические, социальные, организационные и др.;

- абсолютные, относительные (например, КПД), структурные (например, затраты на НИОКР составляют 2 % суммарных затрат за жизненный цикл объекта), удельные (например, норматив расхода топлива на 100 км пробега автомобиля, удельная цена как отношение цены объекта к полезному эффекту за его нормативный срок службы);
- среднеарифметические, средневзвешенные и др.

В общем случае показатель относится к синонимическому ряду термина «коэффициент», который определяется как *«числовой множитель при буквенном выражении, известный множитель при той или иной степени неизвестного или постоянный множитель при переменной величине»* [193], и чаще всего применяется в математике.

Параметры и показатели в равной степени являются физическими величинами, характеризующими те или иные свойства объекта (надёжность, прочность, жёсткость, геометрические размеры, настройку, динамику и т. п.). При этом под параметрами понимают величины, интенсивность которых может быть непосредственно измерена техническими средствами или вычислена (длина, сила, момент и т. д.), а под показателями – только вычисленные обобщающие данные, по которым можно судить о состоянии рассматриваемого свойства или параметров (запас прочности, запас движущего момента, ВБР, вероятность и т. д.). Параметры всегда определяются числовыми значениями и единицами физических величин, поскольку служат потребностям измерения геометрических и физических величин окружающего мира, а показатели – только отвлечённым числом, входящим в значение величины [194].

Использование показателей для количественной оценки свойств даёт возможность учёта:

- свойств, которые могут быть различимы только качественно в бинарной форме: «ноль–единица», «да–нет», или характеризоваться исключительно показателями надёжности, например ВБР;
- статистических характеристик для КЭ конструкций, имеющих тактовые (элементы массового производства если их количества достаточно для статистических обобщений);
- степени уверенности по исключению рисков отказов (в случае применения соответствующих конструктивных и технологических решений) на основе объективных средств и методов контроля.

Совместное использование параметров и показателей при составлении параметрического описания объекта предоставляет возможности оценки надёжности не только при помощи количественной информации (через параметры или показатели), но и при помощи качественной информации (через показатели); сплошного учёта параметров и показателей, влияющих на надёжность, и, как следствие, исключения неосознанной

избирательности и субъективизма при выборе параметров для оценки надёжности.

Применение понятий «параметр» и «показатель» в параметрическом описании объекта позволяет выбирать величины, удобные для характеристики свойств. Например, для определения свойств прочности можно использовать:

- значения действующих нагрузок (параметры), если по ним можно однозначно судить о НДС (растяжение, сжатие, сдвиг, изгиб, кручение, устойчивость);
- значения действующих напряжений (параметры), если необходимо различать предельные состояния прочности (общая прочность, усталость, долговечность, длительная прочность, температурная прочность, ползучесть и т. д.);
- запасы прочности (показатели), если учитывается сложное напряженное состояние по выбранному критерию прочности (предельному НДС);
- ВБР (показатели), если свойство прочности рассматривается как стохастическая величина.

Важно отметить, что верхние и нижние допустимые границы параметров и показателей в общем случае могут иметь различный физический смысл (2.64)–(2.65). Например, запас движущего момента k выражает свойство энергодостаточности приводов для поворота конструкции и определяет нижнюю границу показателя (при малых запасах движущего момента поворотная конструкция может не раскрыться). Верхнюю границу данного показателя определяет свойство прочности поворотной конструкции при фиксации в рабочее положение вследствие перехода кинетической энергии поворота в потенциальную энергию деформации в момент мгновенной остановки движения (при больших запасах движущих моментов конструкция может разрушиться). Значит, показатели количественно характеризуют свойства изделий в несогласованном безразмерном виде, что не даёт возможности свести многопараметрическое описание к единому обобщённому показателю надёжности, не говоря уже о том, что сами параметры, используемые для параметрического описания, имеют разные единицы измерения.

Отсутствие методик учёта и приведения многопараметрических моделей к обобщённому показателю надёжности нашло отображение в основах параметрической надёжности, *«связанной не с отказом функционирования изделия, а с изменением его выходных параметров»* [12]. Фактически в параметрической надёжности работоспособность изделия устанавливается по *«определяющему параметру»*. Состояние изделия считается работоспособным, если значение этого параметра для какого-либо элемента X ,

который служит мерой качества, в процессе функционирования согласно (4.1) не выходит за пределы установленной «рабочей области» или «поля допуска» [195].

Для получения обобщённого показателя надёжности необходимо привести значения всех параметров и показателей, составляющих параметрическое описание, к согласованному безразмерному виду, т. е. свести все значения параметров в различных единицах измерения и все отвлечённые числовые значения показателей к численному виду, в котором значения параметров и показателей можно «складывать».

Это возможно, если условие (4.3) выразить вероятностью нахождения значений параметров или показателей в заданном диапазоне в следующем виде:

$$P_i(t) = P\left[X_i^{\min} \leq X_i(\tau) \leq X_i^{\max}; 0 \leq \tau \leq t\right]. \quad (4.14)$$

В этом случае обобщённый показатель надёжности с учётом параметрического описания изделия (4.12) можно рассчитать методом структурной схемы надёжности, учитывающим функциональную взаимосвязь между работой элементов с определённой безотказностью (4.14) в определённой последовательности. Например, для изделий, в которых все элементы конструкций являются точками единичного отказа, что характерно для функционирования МУ ОС, вероятность безотказной работы с учётом (4.14) определяется по формуле (2.20).

Из гипотезы о пересечении параметрического и функционального подходов к надёжности следует, что формула (2.20) с учётом (4.12) и (4.14) эквивалента функции надёжности (2.78) для обобщенной параметрической модели функционирования.

Условием использования гипотезы о пересечении параметрического и функционального подходов к надёжности является необходимость расширенной трактовки термина «надёжность», устраняющей противоречие параметрического и функционального определений надёжности путём добавления в его параметрическое определение [82] словосочетания: *и/или показателей*.



Надёжность – свойство системы сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров **и/или показателей**, характеризующих способность системы выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования

Практическим результатом применения гипотезы о пересечении параметрического и функционального подходов к надёжности будет возмож-

ность упрощения сложных взаимосвязей параметров для количественного определения свойств. Например, для поворотной штанги (см. рис. 2.3) соотношение между движущим моментом и моментом сил сопротивления (2.45) может определяться не только с учётом выполнения статического равновесия при вращательном движении (2.17), но и уравнения динамики вращательного движения

$$M_{\text{дв}}(\varphi) - M_{\text{с}}(\varphi) = J_0 \cdot \ddot{\varphi}(t), \quad (4.15)$$

где J_0 – момент инерции штанги относительно оси вращения; $\ddot{\varphi}(t)$ – угловое ускорение штанги.

С учётом (4.15) возможность безостановочного движения штанги определяется выражением

$$\frac{M_{\text{дв}}(\varphi) - M_{\text{с}}(\varphi)}{J_0 \cdot \ddot{\varphi}(t)} > 1. \quad (4.16)$$

Неравенство (4.16) следует использовать при анализах надёжности крупногабаритных конструкций с установленным ограничением по времени раскрытия

$$t_p < t_{\text{зад}}, \quad (4.17)$$

где t_p – расчётное время раскрытия, которое находится путём интегрирования дифференциального уравнения (4.15); $t_{\text{зад}}$ – время раскрытия, заданное в техническом задании на разработку.

Поскольку заданному времени раскрытия $t_{\text{зад}}$ соответствует ускорение $\ddot{\varphi}_{\text{зад}}$, то выражение (4.16) с учётом (4.17) (что равнозначно $\ddot{\varphi}(t) > \ddot{\varphi}_{\text{зад}}$) принимает вид

$$\frac{M_{\text{дв}}(\varphi) - M_{\text{с}}(\varphi)}{J_0 \cdot \ddot{\varphi}_{\text{зад}}} > 1,$$

которое при детерминированном подходе по аналогии с (2.42) можно представить как

$$\eta_J = \frac{M_{\text{дв}}^{\text{мин}}(\varphi)}{M_{\text{с}}^{\text{макс}}(\varphi) + J_0^{\text{макс}} \cdot \ddot{\varphi}_{\text{зад}}} > 1, \quad (4.18)$$

где η_J – динамический запас движущего момента.

Если выражение (2.42) записать в виде

$$\eta_M = \frac{M_{\text{дв}}^{\text{мин}}}{M_{\text{с}}^{\text{макс}}} > 1, \quad (4.19)$$

где η_M – статический запас движущего момента, то с учётом (4.18)–(4.19) условие осуществления устойчивого движения поворотной конструкции с заданными параметрами раскрытия имеет вид

$$\eta > \eta_{\min} = \min(\eta_M, \eta_J), \quad (4.20)$$

где η – обобщённый запас движущего момента.

Физический смысл обобщённого запаса движущего момента η в отличие от запаса движущего момента k в выражении (2.24) следует из структуры формулы (2.21): запас движущего момента k служит аналогом коэффициента безопасности f_6 , а обобщённый запас движущего момента η – запаса прочности n_3 . При этом η призван учитывать характер сопротивления движению, или, другими словами, характер нагрузки, ограничивающей работу привода, а k учитывает разбросы параметров привода и ШУ в пределах установленных допусков на изготовление (см. п. 2.7.4).

Как было сказано ранее, в качестве одного из ограничений работы привода при повороте штанги необходимо рассматривать соблюдение условий прочности при динамических нагрузках, возникающих при фиксации штанги в рабочем положении для того, чтобы высвобождаемая энергия привода при раскрытии штанги не привела к разрушению или пластическим деформациям её конструкции при фиксации.

Расчёт динамических нагрузок, возникающих при фиксации штанги в рабочем положении, заключается в определении сил, действующих на сосредоточенные массы расчётной модели штанги при её свободных колебаниях [196], вызванных мгновенным наложением механической связи в ШУ на движущуюся с угловой скоростью штангу в момент фиксации (см. рис. 2.3). Необходимые для расчёта динамических сил параметры движения (время раскрытия t_p штанги из сложенного положения в рабочее положение, а также зависимости угла раскрытия $\varphi(t)$ и угловой скорости $\dot{\varphi}(t)$ от времени) находятся путём интегрирования дифференциального уравнения движения штанги (4.15).

Уравнения свободных колебаний штанги в декартовой системе координат без учёта демпфирования имеют вид

$$[m] \cdot \ddot{\vec{x}} + [k] \cdot \vec{x} = 0, \quad (4.21)$$

где $[m]$, $[k]$ – соответственно матрицы масс и жесткостей; \vec{x} , $\ddot{\vec{x}}$ – вектор перемещений и вектор ускорений.

Уравнение (4.21) может быть преобразовано в уравнение собственных значений

$$[k - p^2 \cdot m] \cdot \vec{x} = 0,$$

из которого определяются матрицы собственных форм колебаний $[\Phi]$ и вектор собственных частот \vec{p} .

Для каждой n -й формы колебаний определяют обобщённую массу M_n и обобщённую жёсткость K_n :

$$M_n = \bar{\Phi}_n^T \cdot [m] \cdot \bar{\Phi}_n, \quad K_n = \bar{\Phi}_n^T \cdot [k] \cdot \bar{\Phi}_n.$$

Уравнение колебаний для каждой формы имеет вид

$$M_n \cdot \ddot{y}_n + K_n \cdot y_n = 0, \quad \text{или} \quad \ddot{y}_n + p_n^2 \cdot y_n = 0. \quad (4.22)$$

Решение уравнения (4.22) имеет вид

$$y_n(t) = \frac{\dot{y}_n(0)}{p_n} \cdot \sin p_n t + y_n(0) \cdot \cos p_n t.$$

Величины $y_n(0)$, $\dot{y}_n(0)$ выражаются через вектор начальных перемещений $\vec{x}(0)$ и вектор начальных скоростей штанги $\vec{\dot{x}}(0)$:

$$y_n(0) = \frac{\bar{\Phi}_n^T \cdot [m] \cdot \vec{x}(0)}{M_n},$$

$$\dot{y}_n(0) = \frac{\bar{\Phi}_n^T \cdot [m] \cdot \vec{\dot{x}}(0)}{M_n}.$$

Вектор динамических сил, действующий на сосредоточенные массы штанги, равен

$$\vec{F}(t) = [m] \cdot [\Phi] \cdot [p_n^2 \cdot y_n(t)],$$

где $[p_n^2 \cdot y_n(t)]$ – вектор обобщённых перемещений, умноженных на квадраты собственных частот.

С учётом начальных условий

$$\vec{x}(0) = 0, \quad \vec{\dot{x}}(0) = \vec{\omega}_k \vec{R},$$

где \vec{R} – вектор-радиус положения сосредоточенных масс штанги относительно оси вращения, максимальное значение обобщённого перемещения y_n равно

$$y_n = \frac{\bar{\Phi}_n^T \cdot [m] \cdot \vec{\omega}_k \cdot \vec{R}}{M_n}. \quad (4.23)$$

Вектор динамических сил с учётом выражения (4.23) принимает вид

$$\vec{F} = [m] \cdot [\Phi] \cdot [p_n^2 \cdot y_n].$$

Таким образом, расчётный момент динамических сил относительно оси вращения при фиксации равен

$$\vec{M}^P = \vec{R} \cdot \vec{F}. \quad (4.24)$$

В детерминированной постановке с учётом коэффициента безопасности [90] выражение (4.24) имеет вид

$$M = M^P \cdot f_б.$$

Условие сохранения прочности силовых элементов консольной конструкции при действии момента динамических сил M с учётом (3.12) и (3.16) можно записать в таком виде:

$$n_k = \frac{A_{дв}^{макс}(\varphi_k)}{A_c^{мин}(\varphi_k) + \Pi_{пред}} < 1, \quad (4.25)$$

где n_k – коэффициент энергетического запаса прочности консольной конструкции; $\Pi_{пред}$ – предельно допустимая потенциальная энергия деформации изгиба консольной конструкции в рабочем положении по напряжениям (перемещениям) в результате деформации под действием динамических нагрузок, образующихся при мгновенной остановке поворотной конструкции.

Если $n_k > 1$, то необходимо либо повысить предельно допустимую потенциальную энергию деформации изгиба консольной конструкции в рабочем положении за счёт применения соответствующих конструктивных материалов или выбора поперечных сечений конструктивных элементов, либо снизить значение величины движущего момента привода при условии выполнения (4.20).

Как видно из формулы (3.12), накопление кинетической энергии возможно только при наличии энергетического запаса движущего момента η_A :

$$\eta_A = \frac{A_{дв}(\varphi)}{A_c(\varphi)} > 1. \quad (4.26)$$

В произвольной точке, например $\varphi = \varphi_k$, выражение (4.26) может быть преобразовано к следующему виду:

$$\eta_A(\varphi_k) = \lim_{\varphi \rightarrow \varphi_k} \frac{A_{дв}(\varphi)}{A_c(\varphi)}. \quad (4.27)$$

При движении поворотной конструкции с ускорением энергетический запас движущего момента (4.26) в конце раскрытия в общем виде можно выразить через коэффициент энергетического запаса прочности консольной конструкции в момент фиксации посредством операторного соотношения

$$\eta_A(\varphi_K) = L(n_K). \quad (4.28)$$

Предельно допустимое значение коэффициента энергетического запаса прочности консольной конструкции в рабочем положении $n_K^{\text{пред}}$ реализуется при условии (3.13), когда $A_c^{\text{мин}}(\varphi_K) = 0$. Тогда для проведения оценочных расчётов выражение (4.25) можно использовать в виде

$$n_K^{\text{пред}} = \frac{A_{\text{дв}}^{\text{макс}}(\varphi_K)}{\Pi_{\text{пред}}} < 1. \quad (4.29)$$

Для штанги (см. рис. 2.3) числитель и знаменатель в формуле (4.29) может быть определён при помощи формул (3.14) и (3.16) с учётом (4.24). Исходя из (4.25)–(4.29) можно записать выражение для максимально допустимого значения энергетического запаса движущего момента $\eta_A^{\text{макс}}(\varphi_K)$ так:

$$\eta_A^{\text{макс}}(\varphi_K) \leq L(n_K^{\text{пред}}). \quad (4.30)$$

С учётом (4.18)–(4.20) и (4.30) условие работоспособности МУ ОС поворотного типа при раскрытии можно выразить через обобщённый запас движущего момента, по сути своей – через показатель, в виде неравенства

$$\eta_{\text{мин}} < \eta < \eta_A^{\text{макс}}(\varphi_K). \quad (4.31)$$

Надёжность поворота конструкции штанги с учётом (4.14) и (4.31) может быть определена по формуле

$$P(t) = P\left[\eta_{\text{мин}} \cdot M_c^{\text{макс}} < M_{\text{дв}} < \eta_A^{\text{макс}}(\varphi_K) \cdot M_c^{\text{макс}}\right],$$

которая намного результативнее для вычисления надёжности при раскрытии, чем (2.84).

4.3. Надёжность как способность проявлять заданные свойства во времени

Надёжность принято рассматривать как свойства готовых изделий, которые проявляются в процессе эксплуатации с началом наработки, при этом функцию интенсивности отказов $\lambda(t)$ обычно иллюстрируют с помо-

щью U -образной кривой, которая совместно с другими характеристиками надёжности: ВБР $P(t)$ и плотностью распределения отказов $f(t)$ (2.3), представлены на рис. 4.6 в виде типичных форм кривых, характеризующих указанные зависимости [197].

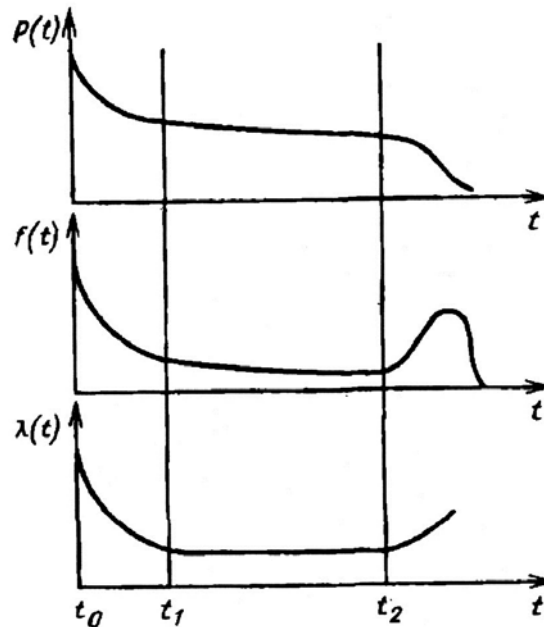


Рис. 4.6. Типичные формы кривых для основных характеристик надёжности

U -образная кривая надёжности изначально получила известность как эмпирическое отображение интенсивности отказов устройства запуска одного из типов самолётов гражданской авиации [198]. U -образная кривая имеет два явно выраженных горба на участках t_0-t_1 и $t > t_2$. Первый отражает ранние отказы из-за конструкторских и производственных дефектов, а второй – отказы из-за старения и износа элементов конструкций в процессе суммарной наработки.

Если считать, что целевое назначение МУ ОС заключается в трансформировании КА из стартовой конфигурации в рабочую, то исчисление наработки t_0 начинается с момента подачи команды на раскрытие конструкций из сложенного положения в рабочее и заканчивается фиксацией в этом положении, после чего целевое назначение МУ ОС, связанное с трансформированием КА, считается выполненным. Нарботка МУ ОС при раскрытии определяется одноразовым срабатыванием механизмов раскрытия и фиксации, в течение которого не могут развиваться повреждения, связанные со старением и износом. Следовательно, весь процесс раскрытия по условиям функционирования не может выходить за рамки периода времени t_0-t_1 на U -образной кривой надёжности (рис. 4.6).

Характерным условием эксплуатации МУ ОС является то, что только в течение периода времени t_0-t_1 на конструкции МУ воздействуют именно те внешние факторы, при которых и предполагалось их функционирование. Это факторы космического пространства: нестационарные тепловые потоки солнечного излучения и космического холода в диапазонах от аномально положительных до аномально отрицательных температур, вакуум, невесомость, радиация и т. п. Причём указанные факторы не могут быть в точности воспроизведены при проверках функционирования на Земле: какие-то из них физически невозможно имитировать при наземной экспериментальной отработке (требуемую степень вакуумирования внешней среды для испытаний, тепловые потоки с градиентами температур, характерных для космического вакуума и т. п.), а какие-то можно имитировать с определёнными ограничениями (невесомость можно воспроизводить в пределах технических возможностей стендов обезвешивания по компенсации веса РК с приемлемой погрешностью). На Земле технически невозможно достоверно имитировать комплексное воздействие температур, вакуума, невесомости, радиации и прочих воздействий. Например, полномасштабная наземная отработка на раскрытие крупногабаритных антенн на КА «Кику-8» не проводилась из-за отсутствия технических возможностей осуществить их полное раскрытие на Земле (см. табл. 2.1). Таким образом, натурные значения ФКП воздействуют на МУ ОС только один раз – при раскрытии на орбите.

Следовательно, отказы при раскрытии МУ ОС могут произойти из-за конструкторских ошибок и производственных дефектов, а также из-за дефектов, повреждений и разрушений, которые могут возникать на этапе эксплуатации в сложённом положении – предшествующему раскрытию. При этом нет математических моделей, пригодных для инженерной практики, с помощью которых можно было бы прогнозировать причины таких отказов и вычислять параметры U -кривой надёжности на участке t_0-t_1 [113]. Тем не менее существует возможность оценить тенденции по изменению ВБР при функционировании МУ ОС. Предположим, что конструкция МУ при раскрытии может внезапно отказать в какой-либо момент времени, а восстановить или отремонтировать её в последующие моменты времени невозможно. Определим вероятность $P_p(t)$, с которой такая конструкция будет функционировать в пределах периода раскрытия вплоть до момента наступления времени t . Если представить работоспособность МУ ОС как выборку последовательных независимых испытаний τ с периодичностью проведения $\lambda = t/\tau_n$, каждое из которых определяется исходами с вероятностями $P_v(\tau)$, то искомую вероятность функционирования в период времени t можно представить в виде

$$P_p(t) = \prod_{\tau=1}^{\tau_n} P_v(\tau). \quad (4.32)$$

С течением времени t (согласно формуле (4.32)) вероятность функционирования МУ ОС не может повышаться, а только снижаться (как показано на рис. 4.6) из-за ненадлежащего учёта условий и режимов функционирования либо оставаться постоянной, если не существует особых причин для изменения состояний конструкции в процессе раскрытия.

Теперь примем во внимание тот факт, что до момента времени t_0 МУ ОС эксплуатировались в сложенном положении, испытывая внешние воздействующие факторы, отличные от факторов космического пространства, при которых происходит раскрытие. Очевидно, что на начало работки при раскрытии t_0 состояние МУ ОС должно отражать суммарный результат воздействия ВВФ при эксплуатации в сложенном положении, причём очевидно, что вероятность $P_s(t)$, с которой конструкция будет функционировать в сложенном положении в пределах эксплуатации вплоть до наступления времени $t = t_0$, может быть определена по аналогии с тем, как вычисляется вероятность $P_p(t)$ согласно (4.32).

Суммарное снижение $P_s(t)$ к началу процесса раскрытия МУ ОС является результатом стохастических изменений состояния конструкций под воздействием ВВФ в сложенном положении (перегрузок, ударов, сотрясений, вибраций, колебаний температур, влажности, агрессивных сред и пр.) из-за реализации следующих процессов:

- деградации физико-механических свойств материалов из-за износа, коррозии, старения, охрупчивания и т. д.;
- изменений физико-механических характеристик материалов при воздействии знакопеременных температур;
- необратимых деформаций и разрушений (пластических деформаций, смятия контактных поверхностей, ползучести, трещин и т. д.);
- ухудшения характеристик трибосопряжений;
- проявления конструкционных нестабильностей в виде смещений зафиксированных деталей, самоотвинчивания в резьбовых соединениях, изменений люфтов в подвижных узлах, нарушений регулировок механизмов и т. п.

Таким образом, суммарная вероятность функционирования МУ ОС с учётом эксплуатации в сложенном положении и раскрытия в рабочее положение $P_f(t)$ в силу непрерывности процесса функционирования может быть определена по формуле, эквивалентной (2.1):

$$P_f(t) = P_s(t) \cdot P_p(t). \quad (4.33)$$

Вероятность $P_f(t)$ является показателем, который количественно определяет свойство безотказности при условии, что на момент начала эксплуатации в сложенном положении работоспособность МУ ОС обеспечена. Однако если учесть, что для изделий с малой вероятностью отказов ра-

ботоспособность не служит гарантией отсутствия отказов, то следует учитывать вероятность возникновения отказов, вызванных конструкторскими ошибками и несанкционированными антропогенными факторами при производстве, которые определяют конструкторско-технологическое состояние изделий на момент начала эксплуатации.

Учитывая, что для изделий с малой вероятностью отказов риск возникновения отказов при функционировании может определяться не только нерелевантностью значений параметров требованиям нормативно-технической и конструкторской документации, но и отсутствием тех или иных требований в конструкторской и технологической документации, то до начала эксплуатации всегда существует риск с вероятностью γ , что не все параметры и показатели X_i (4.2) при конструировании будут должным образом учтены, а те параметры (показатели), которые заданы в КД, будут находиться при эксплуатации в соответствующем допуске $\Delta X_i \in [X_i^{\min}, X_i^{\max}]$ с учётом (3.21).

Предположим, что все параметры (показатели) МУ ОС независимы в смысле надёжности, а неучёт какого-либо из параметров или выход за пределы допусков любого из них приводит к отказу. Событие, характеризующее переход в состояние готовности к функционированию МУ ОС без отказа, обозначим H , а событие, характеризующее наступление отказа в случае реализации риска с вероятностью γ , обозначим A , тогда

$$\begin{aligned} P(H) + P(A) &= 1, \quad P(A) = \gamma, \\ P(H) &= 1 - \gamma. \end{aligned} \quad (4.34)$$

Из формулы (4.34) понятно, что исходная надёжность МУ ОС до начала эксплуатации $P_0 = P(H) < 1$. Причём при функционировании МУ ОС в момент времени t их надёжность с учётом формул (4.33) и (4.34) равна

$$P(t) = P_f(t) \cdot P(H). \quad (4.35)$$

Формула (4.35) позволяет рассматривать надёжность МУ ОС не только как результат выполнения функций без учёта генезиса своего происхождения, но и как результат процессов, вследствие которых в их конструкции возникают отказы. По структуре и физическому смыслу формула (4.35) близка формуле (2.36), где надёжность функционирования $P_f(t)$ можно интерпретировать как проектную (ожидаемую) надёжность P_{Π} , а исходная надёжность как вероятность $P(H)$ представляет не что иное, как надёжность $P(X_i)$, связанную с конструкторскими, технологическими и производственными ошибками.

Таким образом, заданное в ТЗ на разработку значение показателя безотказности МУ ОС должно определяться с учётом формулы (4.35), ко-

торая подразумевает учёт не только условий эксплуатации, но также факторы конструкторских и производственных предпосылок к отказам:

- несовершенства методов проектирования и конструирования, конструкторских ошибок, нарушений требований НТД, норм и правил конструирования;
- несовершенства и ошибки применяемых технологий;
- дефекты и ошибки при изготовлении, сборке и монтаже, нарушения технологических процессов изготовления, приработка узлов трения и сборки, ухудшение параметров в результате испытаний, предусмотренных производственным циклом.

Мало того, если при условии перехода в состояние готовности к функционированию без отказа, обозначенном как событие H , нормальное выполнение функций МУ при раскрытии обозначить как событие B , то надёжность (4.35) функционирования МУ ОС в течение времени t нужно интерпретировать как условную вероятность

$$P(t) = P(B|H).$$

Исходя из сказанного, надёжность следует рассматривать и оценивать не только на стадиях ЖЦ готового к эксплуатации изделия, но и в тех случаях, когда оно создается в процессе производства или существует в виде таких моделей:

- информационные модели при проектировании;
- графические модели при конструировании;
- модели технологического процесса при подготовке производства.

По мере осуществления последовательного моделирования и производства изделия в течение ЖЦ его ожидаемая исходная надёжность P_0 на начало эксплуатации имеет тенденцию к снижению из-за неизбежности накопления предпосылок к отказам как из-за ошибок моделирования, так и возникновения различного рода дефектов при производстве.

Из формулы (4.35) следует вывод о том, что надёжность изделий с малой вероятностью отказов необходимо рассматривать не только как свойство, проявляемое при эксплуатации изделия, но и как способность изделия проявлять свойство надёжности, когда оно находится в состоянии ожидания эксплуатации, т. е. ему уже в полной мере присуща способность проявлять свойства надёжности, поскольку взаиморасположение, взаимосвязь и взаимодействие элементов внутри изделия уже осуществлено (изделие готово к эксплуатации), а взаиморасположение, взаимосвязь и взаимодействие его в окружающей среде и с другими объектами предусмотрено и предполагается. Указанное состояние изделия должно быть в полной мере задано КД в виде номинальных значений параметров (показателей) X_i^H (3.19) и соответствующих им допусков ΔX_i (3.20).

Возможность рассматривать надёжность как свойство и как способность в зависимости от нахождения на той или иной стадии ЖЦ позволяет устранить коллизию терминологий надёжности, на которую обращал внимание А.С. Проников [12]. В отечественной литературе термин *надёжность* (*reliability*) чаще всего трактуется как *свойство* (*property*), а в англоязычных источниках определяется преимущественно как *способность* (*ability*) изделий сохранять во времени заданные функции. С позиций рассмотренного выше философического аспекта при эксплуатации изделий, надёжность, безусловно, есть свойство, а на доматериальных стадиях ЖЦ изделий (при изготовлении и в состоянии ожидания эксплуатации) она выступает как способность.

Понимание надёжности как способности и как свойства позволяет разделять задачи практической инженерии, нацеленные на получение функционального и надёжного изделия конструкторско-технологическими методами, а задачи расчётов надёжности – методами классической теории надёжности, которые требуют абстрагирования от выполнения определённых алгоритмов и процедур на стадиях разработки и постановки продукции на производство, а также принятия тех или иных технических решений. Конкретное конструктивное исполнение изделия заменяют математической моделью, которая имитирует механизм его функционирования. При этом генезис надёжности изделия учитывается с помощью неких корреляционных зависимостей, которые призваны подстроить выбранную математическую модель под поведение реального изделия. Отстранение от конструктивного исполнения реальных изделий и генезиса их надёжности приводит к ограничениям области применения современной теории надёжности в технике следующими категориями изделий [82]:

- крупносерийными объектами, изготавливаемыми и эксплуатируемыми в статистически однородных условиях, для которых применимо статистическое толкование вероятности;
- единичными восстанавливаемыми объектами, где в соответствии с НТД допускаются многократные отказы, для описания последовательности которых, применима модель потока случайных событий;
- уникальными и малосерийными объектами, состоящими в свою очередь из изделий массового производства, для которых расчёты показателей надёжности в целом проводят методами статистической теории надёжности по известным показателям надёжности компонентов и элементов.

Рассматривая надёжность как способность проявлять те или иные свойства во времени, возникает необходимость оценивать состояния будущего изделия на протяжении ЖЦ с позиций возможности совершать требуемую работу. По скрупулёзности осуществления процедур такие

оценки мало чем отличаются от процедур конструирования: они непрерывны, конкретны и целенаправленны, поэтому генезис надёжности нужно рассматривать в привязке к требованиям НТД по разработке и постановке на производство изделий.

Согласно государственному стандарту [199] разработка и постановка продукции на производство включает следующие стадии:

1) выпуск *тактико-технического задания* или *технического задания* (далее – ТЗ) на *опытно-конструкторскую работу* (ОКР);

2) проведение ОКР, включая разработку КД и ТД согласно соответствующим стандартам [108; 200];

3) постановку на производство, включая подготовку и освоение производства, изготовление продукции и проведение квалификационных испытаний.

При разработке и постановке продукции на производство с позиций генезиса надёжности имеет смысл рассматривать такие стадии ЖЦ продукции:

- разработка технического задания – установление требований к выпускаемой продукции (стадия ТЗ);
- разработка проектной конструкторской документации, включающая стадии технического предложения, эскизного проекта, технического проекта – увязка и обоснование требований к продукции (стадия ПКД);
- разработка рабочей конструкторской документации – установление требований к продукции в технической документации для её изготовления (стадия РКД);
- разработка технологической документации – увязка и согласование требований КД с возможностями производства (стадия ТД);
- производство (постановка продукции на производство) – выпуск готовой продукции (стадия Пр).

Рассмотрим, как формируется надёжность будущего изделия с позиций способности проявлять те или иные свойства во времени на каждом из этапов ЖЦ.

Очевидно, что к началу выпуска ТЗ на новое изделие, не имеющее аналогов и /или прототипов, его способность проявлять надёжность отсутствует. Если употребить понятие *условная вероятность безотказной работы* (УВБР) изделия, то она равна нулю (нет ещё ничего, не о чем говорить). В случае же модификации разработки исходное значение УВБР должно быть принято исходя из уровня достигнутых показателей ВБР аналогов или прототипов. По мере разработки ТЗ формируются функциональные задачи будущего изделия, задаются условия и режимы эксплуатации, в которых ему предстоит проявить заданное свойство надёжности, определяются необходимые и достаточные внешние параметры проектирования

изделия (3.18). К этому времени должны быть максимизированы знания по выполнению требуемых функций в заданных условиях (3.3): получены и накоплены сведения об условиях внешних воздействий и нагрузок, выполнены фундаментальные исследования по изучению характеристик конструкционных материалов, отработаны ключевые технологии производства и т. п. Чем более обоснованными и точными будут заданы требования в ТЗ, тем выше может быть достигнуто значение УВБР будущего изделия на начало стадии ПКД. Здесь важно понимать, что требуемый уровень надёжности должен быть обеспечен в рамках заданных условий и режимов эксплуатации, которые определены в ТЗ, и если они определены некорректно (нет знания о реальных условиях и режимах эксплуатации), то (исходя из философического понимания надёжности) желаемое качество может оказаться недостижимым, а следовательно, не имеет смысла ставить вопрос о сохранении качества во времени, т. е. о надёжности.

Исходя из требований ТЗ в процессе проектирования закладываются принципы работы будущего изделия, детализируются технические решения, оптимизируются характеристики и алгоритмы его функционирования и т. д. По мере проектирования уточняются расчётные схемы и усложняются методы вычисления параметров. Стадия проектирования соответствует разработке технического предложения и (или) эскизного проекта, а её результатом является ПКД технического предложения [201] и (или) эскизного проекта [202].

На стадии проектирования производят увязки требований ТЗ, в частности для МУ ОС решают следующие задачи:

- решают уравнения связей $F(\vec{X}, \vec{Y})$ между внешними параметрами проектирования и внутренними параметрами изделия (3.18);
- обеспечивают конструкционную прочность (2.21) с учётом выбора параметров конструктивно-компоновочных и конструктивно-силовых схем (см. п. 2.7.2);
- определяют энергетические характеристики приводов раскрытия (2.24)–(2.25) с учётом выполнения условий оптимизации значений обобщённого запаса движущих моментов (сил) (4.31);
- производят максимизацию функции правдоподобия (3.5) за счёт выбора конструкторских решений, позволяющих осуществлять функционирование в максимально широком диапазоне внешних воздействий (см. п. 3.6).

Задача стадии проектирования с позиций надёжности заключается в том, чтобы поднять УВБР на максимальный уровень за счёт принятия рациональных и оптимальных конструкторских решений, исключающих грубые ошибки. Однако при проектировании не может быть достигнута требуемая детализация конструкторских решений, которая позволяла бы

избежать «мелких» конструкторских ошибок [124], имеющих критическое влияние на качество изделия в процессе изготовления. Здесь могут возникнуть две ситуации:

1) фактическая надёжность может оказаться ниже проектного (желаемого) уровня (2.34), когда в процессе разработки рабочей КД могут быть допущены ошибки, например, связанные с неправильным выбором радиальных зазоров в ШУ (2.59);

2) в то же время учёт расширенного числа конструктивных факторов, влияющих на работоспособность, сверх необходимого проектного уровня, например согласно (2.80), снижает риск возникновения отказов, тем самым позволяя хоть незначительно, но повысить УВБР к концу завершения разработки РКД, что может оказаться решающим при конструировании изделия с малой вероятностью отказов.

Таким образом, этап разработки РКД весьма важен в ЖЦ изделия, поскольку к его завершению изделие обладает максимальной способностью проявлять свойство надёжности P_n . Это рассматривается как результат того, на что потенциально способен конструктор, обладающий свойственными ему знаниями, опытом, умениями, квалификацией, каким он пользовался инструментарием для конструирования, нормативно-техническим обеспечением и материально-техническим оснащением для проведения расчётно-экспериментальных и исследовательских работ, мнения каких экспертов он учитывал при принятии своих решений.

На последующих этапах ЖЦ, включая эксплуатацию, реализуются условия к снижению УВБР из-за вероятности отказов γ , связанных с нарушением требований рабочей КД (4.34) при разработке ТД и в производстве, или недолжному учёту условий и режимов эксплуатации (4.32).

Следует различать причины снижения УВБР на стадиях разработки ТД и производства. В первом случае – это результат ошибок технологов, недооценка ими задумки конструкторов, отсутствие технологических возможностей для точного выполнения требований КД, недопустимые погрешности технологического оборудования. Классический пример снижения УВБР при разработке ТД – несовпадения конструкторских баз, определяющих положение ДСЕ в изделии, технологических баз, определяющих положение ДСЕ в процессе изготовления, и измерительных баз, определяющих положение ДСЕ относительно средств измерения. Во втором случае – невыявленные дефекты и повреждения ДСЕ, которые неизбежно возникают при изготовлении.

Главная задача на стадии выпуска готовой продукции – это «не навредить» качеству и надёжности при воплощении чертёжно-текстовой модели в готовое изделие. Здесь максимальная задача заключается в том, чтобы конструктор, технолог и производитель действовали «на одной волне».

Если на основании (4.35) исходить из того, что причины отказов возникают, существуют и развиваются, начиная уже с самых ранних стадий ЖЦ МУ ОС, то условная вероятность отказов вновь разрабатываемого изделия (без прототипов и аналогов) может быть представлена графиком, приведённым на рис. 4.7. На этом рисунке отражён общий (качественный) характер изменения УВБР по стадиям ЖЦ при условии соблюдения требований НТД, ЕСКД, ЕСТД, общетехнических и специальных правил, а также положений *системы менеджмента качества* (СМК), например ИСО 9001. Углы наклона и форма кривой зависимости УВБР от времени в каждом конкретном случае разработки и создания изделий могут несколько отличаться от представленного графика, сохраняя при этом общую тенденцию. Положения точек *A*, *B*, *C*, *D* и *E* по оси ординат зависят от надлежащего выполнения процедур по обеспечению надёжности, что способно не только в значительной степени нивелировать, но в случае ненадлежащего выполнения и существенно усугубить риски возникновения отказов с вероятностью γ из-за конструкторских, технологических и производственных ошибок.

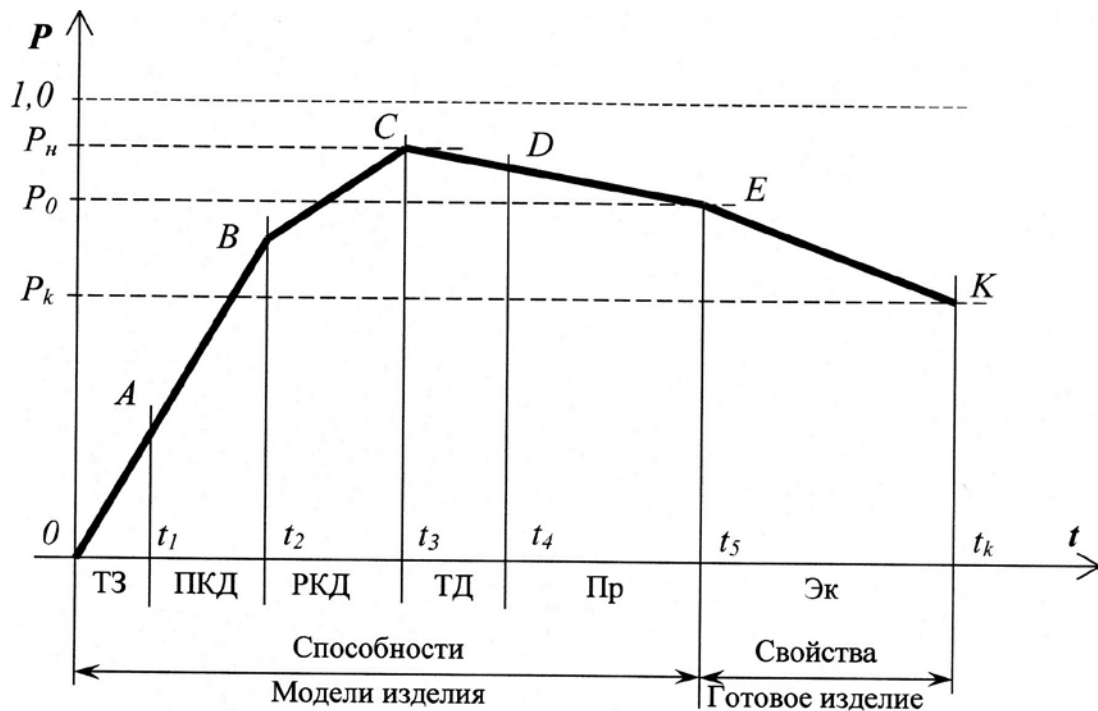


Рис. 4.7. График изменения УВБР по стадиям ЖЦ для изделий, не имеющих прототипов и аналогов. $0-t_1$ – выпуск тактико-технического и/или технического задания на разработку (ТЗ), t_1-t_2 – проектирование и разработка изделия (ПКД), t_2-t_3 – выпуск рабочих чертежей (РКД), t_3-t_4 – технологическая подготовка производства (ТД), t_4-t_5 – изготовление изделия (Пр), t_5-t_k – эксплуатация готового изделия (Эк)

Положения точек *A* и *B* на графике (рис. 4.7) отражают наличие или отсутствие «грубых» ошибок, связанных со степенью завершенности фундаментальных исследований по изучению характеристик конструкционных материалов, получением достоверных сведений об условиях внешних воздействий и нагрузок (для точки *A*), рациональностью выбора конструктивно-компоновочных и конструктивно-силовых схем, соблюдением принципов и правил проектирования (для точки *B*) [203].

При отсутствии «грубых» ошибок в проекте положение точки *B* по оси ординат может приближаться к 1, не достигая её из-за двух групп причин. Первая – это «увязки» проекта, которые могут продолжаться на протяжении всей стадии проектирования и обычно определяются недостаточной проработкой номенклатуры и содержания требований к изготовлению изделий, которые призваны обеспечить его заданную надёжность [204]. Вторая подробно изложена в работе [124] – это разного рода неизбежные «мелкие» ошибки из-за несовершенств методов проектирования, нарушения предписанных положений НТД, недостаточно высокого уровня квалификации проектантов, их психофизиологических особенностей, связанных с невнимательностью, темпом выполнения работ, общим утомлением и т. п. проявлениями.

Недооценка значения стадии проектирования или её игнорирование существенно повышает риск недостижения заданного уровня надёжности. Если указанные «мелочи» проекта должным образом не будут устранены при конструировании, то положение точки *C* по оси ординат на графике может не измениться или даже оказаться ниже положения точки *B*. Задача стадии разработки РКД заключается в повышении надёжности изделия за счёт исправления ошибок проекта и установления необходимых и достаточных требований к их изготовлению.

Положение точек *D* и *E* определяется вероятностью возникновения ошибок при технологической подготовке производства и непосредственном изготовлении изделий. Важную роль здесь играет СМК, которая призвана поднять культуру производства, сократив до приемлемого уровня вероятность производственных ошибок. Важно осознавать, что действующая на производстве СМК не имеет непосредственного отношения к качеству и надёжности самого изделия как конечного продукта, являясь фактически декларацией того, что предприятие способно выпускать продукцию надлежащего качества. Без должного конструкторского и технологического обеспечения сама по себе СМК не решает задач надёжности, но при этом и без надлежащей СМК задачи надёжности решить невозможно. Фактически СМК не может исправить ошибки в КД, зато способствует их точному воспроизведению в готовом изделии.

Положение точки *K* определяется вероятностью допущения ошибок при эксплуатации изделий. Поскольку согласно ГОСТ 2.601 [205] эксплуа-

тационная документация является одним из видов КД, то указанные ошибки определяются, с одной стороны, установлением ясных и чётких требований к исполнению правил эксплуатации, а с другой – надлежащим их исполнением.

Теоретически для изделий с малой вероятностью отказов положения точек C , D , E и K по оси ординат могут достигать своих предельно возможных значений, близких к 1, при условии должного развития и реализации методов анализа и обеспечения надёжности [203]. Смыслы деятельности по стадиям ЖЦ (согласно рис. 4.7) заключаются в следующем:

- отрезок графика $O-A-B$ (стадии ТЗ и ПКД) – это исключение «грубых» ошибок проекта;
- отрезок графика $B-C$ (стадия РКД) – исправление «мелких» ошибок проекта и установление необходимых и достаточных требований к изготовлению изделий;
- отрезок графика $C-D$ (стадия ТД) – исключение каких-либо ошибок при технологической подготовке производства;
- отрезок графика $D-E$ (стадия Пр) – недопущение брака при производстве;
- отрезок графика $E-K$ (стадия Эк) – исключение ошибок при эксплуатации.

Представленный график наглядно иллюстрирует задачи, стоящие на различных стадиях ЖЦ при разработке и производстве МУ ОС:

- при разработке ТЗ (стадия ТЗ) – закончить фундаментальные исследования по изучению характеристик конструкционных материалов и получить все необходимые сведения об условиях внешних воздействий и нагрузок;
- при проектировании (стадия ПКД) – обеспечить максимально возможный уровень надёжности за счёт использования эффективных конструктивных и технических решений;
- при выпуске КД (стадия РКД) – не допустить потери надёжности, достигнутой при проектировании (как минимум), и повысить надёжность за счёт исправления ошибок проекта и установления ясных и чётких требований к изготовлению МУ ОС (как максимум);
- при выпуске ТД (стадия ТД) – не исказить требования к надёжности, которые установлены в КД;
- при производстве (стадия Пр) – не допустить отступлений от требований КД и ТД.

График показывает, что на конец эксплуатации МУ ОС t_k его надёжность P_k имеет минимальное значение, определяемое (4.35). Считается, что изделие обеспечивает заданную надёжность $P_{зад}$ если выполняется неравенство:

$$P_k > P_{зад}.$$

Как следует из рис. 4.7, способность изделия проявлять свойство надёжности при переходах со стадии на стадию ЖЦ существенно меняется и в разной степени сказывается на исходном уровне надёжности к началу эксплуатации P_0 .

На рис. 4.7 отражена важная особенность – на графике разграничены стадии ЖЦ, когда будущее изделие существует в виде моделей и характеризуется способностью проявлять свойство надёжности и когда модель, материализуясь в готовое изделие, проявляет собственно само свойство надёжности. Такое разделение позволяет, во-первых, визуализировать скрытые причины возникновения первого «горба» на U -образной кривой надёжности, во-вторых, получить возможность соотносить величину исходного значения УВБР P_0 к началу эксплуатации с текущими значениями УВБР в процессе разработки изделий с малой вероятностью отказов, что создает условия для нормирования надёжности по стадиям ЖЦ исходя из заданного показателя ВБР на конец эксплуатации P_k .

4.4. Обобщённые понятия надёжности

Представленные в главах 2–4 методологические, конструкторско-технологические и философические аспекты надёжности позволяют обобщить полученные выводы и понятия, относящиеся к надёжности изделий с малой вероятностью отказов, в виде тезисов, на базе которых разработаны методы практической реализации конструкторско-технологических подходов к надёжности.

1) Надёжность в процессе эксплуатации изделия есть свойство, а до начала эксплуатации она рассматривается как способность изделия проявлять заданное свойство надёжности.

2) Надёжность можно трактовать как свойство проявлять целостное единство изделия и отдельные его свойства со стороны стабильности.

3) Надёжность – это единственное свойство изделий, которое зависит от времени, все остальные определяются отношениями вещей: взаиморасположением, взаимосвязью и взаимодействием.

4) Надёжность – рекурсивное свойство изделий, которое характеризует сохранение стабильности качества как главного свойства, так и отдельных простых или сложных свойств, выступая тем самым в виде одного из свойств качества.

5) Надёжность есть качество изделия, развёрнутое во времени, а качество – главное свойство изделия в произвольно взятом временном срезе.

6) Надёжность как свойство может определяться количественно через значения параметров и показателей.

7) Надёжность может определяться обобщённым показателем со стороны целостного единства или через локальные параметры и показатели в параметрическом виде;

8) Параметрическая надёжность может быть определена обобщённым показателем с помощью модели расчёта надёжности, основанной на представлении значений параметров и показателей в согласованном безразмерном виде через вероятности нахождения их значений в заданном допуске, и «складыванием» полученных вероятностей методом структурной схемы надёжности.

10) Надёжность рассматривается исключительно в рамках заданных условий и режимов эксплуатации, причём режимы эксплуатации понимаются как условия, присущие изделию, независимо от того, наблюдаются какие-либо внешние нагрузки и воздействия либо они отсутствуют, а условия эксплуатации – как явления, процессы или среды, внешние по отношению к изделию или его СЧ, которые вызывают или могут вызвать ограничение, или потерю работоспособного состояния изделия в процессе эксплуатации.

11) Модель надёжности можно представить как область случайных процессов, которая при эксплуатации находится внутри детерминированных границ области работоспособного состояния изделия, установленных на начало разработки.

12) Область многомерного случайного процесса формируется многомерным множеством параметров и показателей, изменяющих свои значения с течением времени, а область работоспособности определяется границами их допусков, которые остаются неизменными, определяя «заданные условия и режимы эксплуатации».

13) Параметры (показатели) и их допуски, определяющие параметрическую надёжность, должны быть строго согласованы между собой, т. е. если представить параметры (показатели) и допуски в виде двух вектор-столбцов, то число членов в каждом из них должно быть равным, а члены вектор-столбцов – попарно согласованными из условия, что каждому параметру (показателю) установлен соответствующий допуск.

14) Нахождение значений каждого из параметров (показателей), обеспечивающих способность выполнять заданные функции во времени в заданных условиях и режимах эксплуатации, в границах допусков должно быть обосновано расчётно-экспериментальными методами.

15) Каждому параметру и показателю должно соответствовать требование в КД на изготовление или эксплуатацию, обеспечивающее нахождение значений параметров и показателей в соответствующем допуске; каждое такое требование должно быть установлено в явном виде в одном из конструкторских документов в графической и/или в текстовой форме.

16) Комплект КД рассматривается как стационарная стохастическая модель изделия, представленная в тексто-графической форме, согласованной с параметрической моделью.

17) Каждое из требований КД при изготовлении и эксплуатации должно быть выполнено, а их выполнение – подтверждено техническими средствами контроля.

18) Надёжность на этапе разработки и создания изделий с малой вероятностью отказов следует рассматривать не как абстрактную вероятность осуществления заданной безотказности, а как степень уверенности в том, что человеческие ошибки при конструировании и изготовлении исключены.

19) Все процедуры на этапах разработки и создания изделий с малой вероятностью отказов представляют как единый процесс, направленный на достижение главной цели – обеспечение заданной надёжности конструкторскими, технологическими и производственными методами.

КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ АНАЛИЗА И ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЁЖНОСТИ

5.1. Взаимовлияние конструкторских и технологических факторов на надёжность

Поскольку, как описано в предыдущих главах, конструкторские и технологические факторы оказывают существенное влияние на надёжность, то методы анализа и обеспечения надёжности должны учитывать в первую очередь именно эти факторы, причём в неразрывной взаимосвязи. Предположим, что технологическая подготовка производства в процессе разработки изделий по каким-либо причинам не производится. В этом случае выводы анализов надёжности могут строиться исключительно на допущениях, что условия производства позволяют изготовить изделие в строгом соответствии с требованиями КД, т. е. технологические и производственные ошибки исключены. В таком случае формулу (4.35) можно преобразовать к следующему виду:

$$P(t) = P_f(t) \cdot P(A|B), \quad (5.1)$$

где A – событие, определяющее готовность изделия функционировать без отказов с учётом риска нарушения работоспособности из-за конструкторских ошибок; B – событие, характеризующее готовность изделия функционировать без отказов с учётом риска нарушения работоспособности из-за технологических и производственных ошибок.

Формулы (4.34) и (5.1) связаны между собой таким соотношением:

$$P(A|B) > 1 - \gamma, \quad (5.2)$$

т. е. оценка надёжности на основании лишь анализа КД будет всегда завышенной.

Взаимообусловленность конструкторских и технологических факторов хорошо известна из практики. Изделия, изготовленные по одной и той же КД на двух заводах, будут иметь разное качество и, соответственно, разную надёжность. Причина заключается в различиях производственных и технологических возможностей предприятий (организации производства, применяемых технологий, номенклатуры и типов оборудования, методов технического контроля и пр.) в использовании различных СМК, в неоди-

наковой квалификации работников и т. д. Исходя из этого качество и надёжность изделий машиностроения принято рассматривать в рамках системы конструкторско-технологического обеспечения конкретного производства [206–209]. В основе конструкторских и технологических процедур обеспечения качества и надёжности лежит понятие «технологичность конструкции», как *«совокупность конструктивных и технологических решений, обеспечивающих применение прогрессивной технологии и организации производства с наименьшими затратами времени, труда и материалов, которые обеспечивают наименьшую себестоимость и высокое качество изделия»* [209]. Технологичность конструкции предполагает принятие таких конструкторских решений, которые адаптированы под технологические и производственные возможности данного конкретного завода-изготовителя с минимальными отступлениями от задуманной (желаемой) работоспособности разрабатываемого изделия.

Главная задача конструкторско-технологического обеспечения надёжности – применение эффективных конструкторских решений и их реализация при изготовлении путём использования соответствующей организации производства, технологических процессов, методов контроля и испытаний. Например, обеспечения приемлемой надёжности технологической системы изготовления изделия, регламентации технологической системы изготовления и испытаний, снижения дисперсии показателей качества из-за остаточных и побочных явлений технологических процессов [139], оперативного оценивания параметров качества [206] и пр.

Одна из важнейших процедур КТОН – это неукоснительное выполнение требований НТД и КД в процессе изготовления продукции. Однако всегда существует вероятность того, что конструктор по какой-либо причине не установит в конструкторской документации тех или иных требований, определяющих надёжность изделий, например, он может просто не знать о сопутствующих явлениях технологического процесса и их технологической наследственности, которые должны быть регламентированы соответствующими конструкторскими требованиями [185]. Поскольку основная задача технолога заключается в экономном обеспечении заданных требований конструктора, а не в выяснении причин, по которым те или иные требования им не заданы («не заданы – значит, не важны»), то технологический процесс вполне может быть разработан технологом из соображений оперативной целесообразности. В частности, при конструировании довольно распространена практика отсылки в технических требованиях чертежа на типовые технологические процессы, без вникания конструктора в тонкости их реализации. Так делается, несмотря на то, что практически в каждом типовом техпроцессе существуют операции, которые требуют конкретизации требований в конструкторской документации. Напри-

мер, если в технических требованиях чертежа для клееных соединений указать: «Клей ВК-9 ОСТ 92-0949–74», то для технолога при разработке рабочего техпроцесса исходя из общей отсылки конструктора на типовой техпроцесс [210] не будут определены:

- способы контроля и критерии непроклеев (требования к допустимым непроклеям должны быть установлены в чертеже согласно п. 1.7 указанного типового техпроцесса);
- методы подготовки рабочих поверхностей под склеивание (подготовку поверхностей проводят исходя из требований прочности к клееным соединениям согласно нормам прочности, установленным в чертеже на основании п. 2.1.1 указанного типового техпроцесса);
- режимы термообработки клееных соединений для повышения температуры стеклования клея (указанный типовой техпроцесс предусматривает отверждение клея в нормальных условиях, иные режимы отверждения клея должны быть заданы в чертеже);
- необходимость в проведении испытаний склеенных изделий, виды испытаний и количество изделий, подлежащих испытаниям (требования к проведению испытаний склеенных изделий определяются в чертеже согласно п. 1.9 указанного типового техпроцесса).

Вероятным исходом общей отсылки на типовой технологический процесс склеивания окажется назначение технологом такого объёма и содержания технологических операций по склеиванию, которые соответствуют минимальным временным затратам и материальным издержкам при изготовлении изделия. В результате при формальном выполнении всех требований чертежа надёжность клееного соединения окажется обеспеченной по умолчанию, т. е. как получится. Для исключения подобного рода неопределённостей требования в КД должны быть предельно точными и полными, что обязывает конструктора знать технологию изготовления разрабатываемых изделий.

В общем случае состав требований конструкторской документации должен включать геометрические параметры деталей, физико-механические свойства материалов, параметры качества и твёрдости их поверхностного слоя, допустимость дефектов изготовления деталей (подрезов, забоин, рисок, прижогов, неравномерного наклёпа), допустимость структурных нарушений и химического состава материалов, отклонения форм рабочих поверхностей, разрешённые замены материалов, способы и режимы снятия остаточных деформаций, методы, режимы и объёмы испытаний, методы приёмки продукции и т. п. [185]. Для изделий с малой вероятностью отказов такие требования могут оказаться определяющими, а их выполнение при изготовлении – обязательными. Основанием для установления требований в КД служат заданные условия работы и необходимые эксплуатаци-

онные характеристики изделий. Например, если к болту предъявляются повышенные требования по износостойкости и прочности на срез, то в первом случае в требованиях чертежа на болт необходимо установить соответствующие зазоры в сопряжениях, шероховатость контактных поверхностей и твёрдость материала, а во втором случае, исходя из условий прочности на срез, – выбрать подходящий конструкционный материал и площадь поперечного сечения болта [185].

Иногда требуется предусмотреть в КД особые технологии и особое отношение к выполнению технологических операций, чтобы исключить малейшую возможность образования дефектов. Такие действия называют **особо ответственными операциями** [211], к числу которых относятся операции:

- выполняемые наиболее квалифицированными работниками, имеющими необходимые навыки и аттестованными на право их выполнения (определение центра масс, оптическая и электрическая юстировка, выполнение сварных швов в сборочных единицах съёмных грузозахватывающих приспособлений и т. д.);

- влияющие на жизнеспособность изделий при штатной эксплуатации (контроль работоспособности механических систем, контроль герметичности изделий методом вакуумирования, выполнение заключительных сварных или паяных швов, обеспечение герметичного закрытия полостей и т. д.);

- отступление от требований к изготовлению которых может привести:

- а) к необратимым повреждениям изделий и их СЧ (продувка изделий, заправка изделий рабочей жидкостью и газом, работы с пиросредствами и пр.);

- б) существенным экономическим затратам в результате несоответствия (неисправности) при автономных и комплексных испытаниях приборов и узлов, изделий.

Особо ответственные операции должны быть помечены в требованиях КД словом «ВНИМАНИЕ!», которое подразумевает особый регламент проведения технологических операций: соответствующую квалификацию рабочих, временной интервал рабочей смены, в течение которого должны быть выполнены операции, особый порядок проведения технического контроля и пр.

Требования конструкторской документации, влияющие на надёжность, не столь многочисленны, как может показаться на первый взгляд, их доля на примере авиационных двигателей составляет 0,5–0,7 % от всех требований КД [185].

Исходя из графика рис. 4.7, задачи конструкторско-технологического обеспечения надёжности по стадиям ЖЦ сводятся к определённым меро-

приятиям, которые должны выполняться конструкторами (для достижения максимально высокого положения точки *C*) и технологами (для минимизации ошибок в производстве, а следовательно – уменьшения перепада между точками *C*, *D* и *E*). Указанные мероприятия осуществляются конструкторско-технологическими методами, основная идея которых заключается в реализации процедур, направленных на установление требований в КД для достижения работоспособного состояния изделия и гарантирующих исполнение этих требований при изготовлении. Таким образом, к основным процедурам конструкторско-технологического обеспечения надёжности относятся:

- установление в конструкторской документации необходимых и достаточных требований, определяющих надёжность;
- строгое выполнение установленных требований на этапе изготовления;
- технический контроль за соблюдением установленных требований при изготовлении.

В случае разработки и изготовления изделий с малой вероятностью отказов для снижения их отказоспособности указанные процедуры КТОН должны дополнительно включать анализы, подтверждающие, что необходимые и достаточные требования КД, определяющие надёжность, установлены в полной мере, а конструкторские и технологические процедуры выполнены надлежащим образом.

При этом указанные анализы должны рассматриваться как важнейшая и неотъемлемая часть методологии конструкторско-технологического обеспечения надёжности.

5.2. Предпосылки для разработки методов анализа надёжности с учётом конструкторских и технологических факторов

Предположим, что способность изделия к функционированию полностью определяется его работоспособным состоянием, при этом функционирование трактуется как выполнение в объекте процесса, соответствующего заданному алгоритму и проявлению объектом заданных свойств [103], а работоспособное состояние как состояние объекта, при котором значения всех параметров, характеризующих способность выполнять заданные функции, соответствуют требованиям НТД и КД [82]. Значит, невозможность отказа как события, заключающегося в сохранении работоспособного состояния объекта, определяется такими свойствами изделия, которые обеспечивают безусловное выполнение заданных функций.

Допустим, что в результате анализов могут быть выявлены все основные функции изделия с позиций надёжности и вследствие этого – все отказы изделия, как признаки нарушения данных функций, т. е. существует возможность превентивно определить невыполнимость значений тех или иных параметров при функционировании. Исходя из чего логика такого анализа может строиться на представленных ниже гипотезах.

Каждый отказ может произойти только из-за конкретных причин, непосредственно их порождающих, которые возникают, существуют и развиваются в условиях совокупных факторов внешней среды и режимов работы изделия. Любая причина отказа становится невозможной, если соответствующему критичному элементу конструкции придать такие свойства, которые бы обеспечивали безотказность работы изделия, были бы заранее предусмотрены и надлежащим образом учтены при конструировании. Метод установления свойств КЭ, обеспечивающих безотказность, может быть создан при использовании условий отрицательных суждений (антитезисов), которые были впервые применены Н.М. Герсевановым в 1923 г. для расчёта устойчивости гидротехнических сооружений [212]. Искомое свойство может быть обнаружено в результате построения логических формул типа «для того, чтобы исключить причину отказа в виде... / необходимо, чтобы (такой-то) критичный элемент обладал свойством...». Логическая схема такого анализа требует выявления условий и причин возникновения отказов, для чего 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 устраняют **причины** возможных отказов, то это служит доказательством того, что означенное отрицательное суждение ложно и, следовательно, безотказность обеспечена. Таким образом, любая возможная причина отказа может парироваться приданием критичным элементам строго определённых свойств, которые должны быть реализованы в КД и осуществлены при изготовлении.

Выявленные методом парирования свойства критичных элементов изделия, которые обеспечивают безотказность, могут быть выражены количественно с помощью показателей или параметров, удобных для характеристики и учёта искомых свойств. При этом функционирование можно представить параметрами и показателями X_i , которые описывают процесс, соответствующий заданному алгоритму и проявлению изделием всех заданных свойств, по аналогии с (3.19):

$$X = (X_1, X_2, \dots, X_n)^T. \quad (5.3)$$

Вектор-столбец параметров и показателей (5.3) определяет полную функциональность изделия, а его члены – положение показателей и пара-

метров внутри области работоспособных состояний G (2.76). Важно понимать, что на этапах проектирования и конструирования, когда ещё не существует самого изделия, параметры и показатели будущей конструкции X_i рассматриваются с учётом зависимости (2.73), в которой физические величины x_i являются вспомогательными характеристиками для описания случайного процесса, составляющего область допустимых состояний Ω (2.67). По мере решения уравнений связи $F(\vec{X}, \vec{Y})$ (3.18), физические величины x_i обретают соответствующие им значения параметров и показателей X_i конструкции, которые в процессе функционирования должны находиться внутри области работоспособного состояния G (2.76) – заданных ограничений при проектировании. Процедура составления вектор-столбца (5.3) рассматривается как действие, направленное на установление необходимых и достаточных параметров (показателей) конструкции, обеспечивающих их работоспособность.

Таким образом, при проведении анализов конструкторских решений, направленных на достижение заданной надёжности, существует возможность максимально повысить уровень УВБР на момент завершения выпуска КД (обеспечить положение точки C на графике (рис. 4.7), максимально близкое к единице) за счёт осуществления полной параметризации изделия.

Для изделий с малой вероятностью отказов предложенный подход к проведению анализов надёжности позволяет одновременно повышать функцию надёжности $P(t)$, характеризующую работоспособность, и понижать функцию отказа $Q(t)$, определяющую отказоспособность, которые дополняют друг друга до 1 (4.5). При этом для снижения отказоспособности решаются две задачи:

- 1) устанавливаются требования в КД, отсутствие или нечёткость требований которых могут привести к вероятности возникновения отказов;
- 2) определяют релевантность значений внутренних параметров установленным требованиям в КД.

Причины возможных отказов могут быть выявлены в результате системного анализа в соответствии с определённым алгоритмом:

- выдвигается гипотеза о возможности возникновения того или иного отказа изделия вследствие нарушения выполнения какой-либо из его функций. Отказ выражается словесной формулой, представляющей собой логическое понятие, которое содержит совокупность признаков, достаточных для характеристики его сущности. Примеры формул отказов замка системы зачехловки МУ ОС: несанкционированное срабатывание механизмов замка в стартовом положении закрепляемых конструкций, несрабатывание механизмов замка по заданной команде, не разделение или не отделение частей закрепляемой конструкции после срабатывания механизмов замка и т. п. Гипотетические отказы формулируют на основе анализа, в ре-

зультате которого выявляются все функции, выполняемые механизмами раскрытия, критерии нарушения функций и отказы как недопустимые нарушения критериев работоспособности при выполнении функций;

- определяются условия возникновения гипотетических отказов исходя из худшего случая сочетаний факторов внешней среды, режимов работы и конструктивно-технологического исполнения МУ ОС. Примеры условий гипотетических отказов в замке системы зачековки: превышение допустимого уровня нагружения элементов замка при функционировании, вибрационное воздействие при эксплуатации, ошибки при проведении технологических настроек исходных положений механизмов замка (например связанные с неучётом эффекта гравитации), недостаточное энергетическое обеспечение поворота исполнительных звеньев механизма замка и т. п.;

- выявляются причины гипотетических отказов, вызванные условиями их возникновения. Примеры причин гипотетических отказов МУ ОС: разрушение элементов конструкций, самоотвинчивание элементов крепления в резьбовых соединениях, недопустимые тепловые деформации конструктивных элементов, недостаточный запас движущих моментов и т. п.

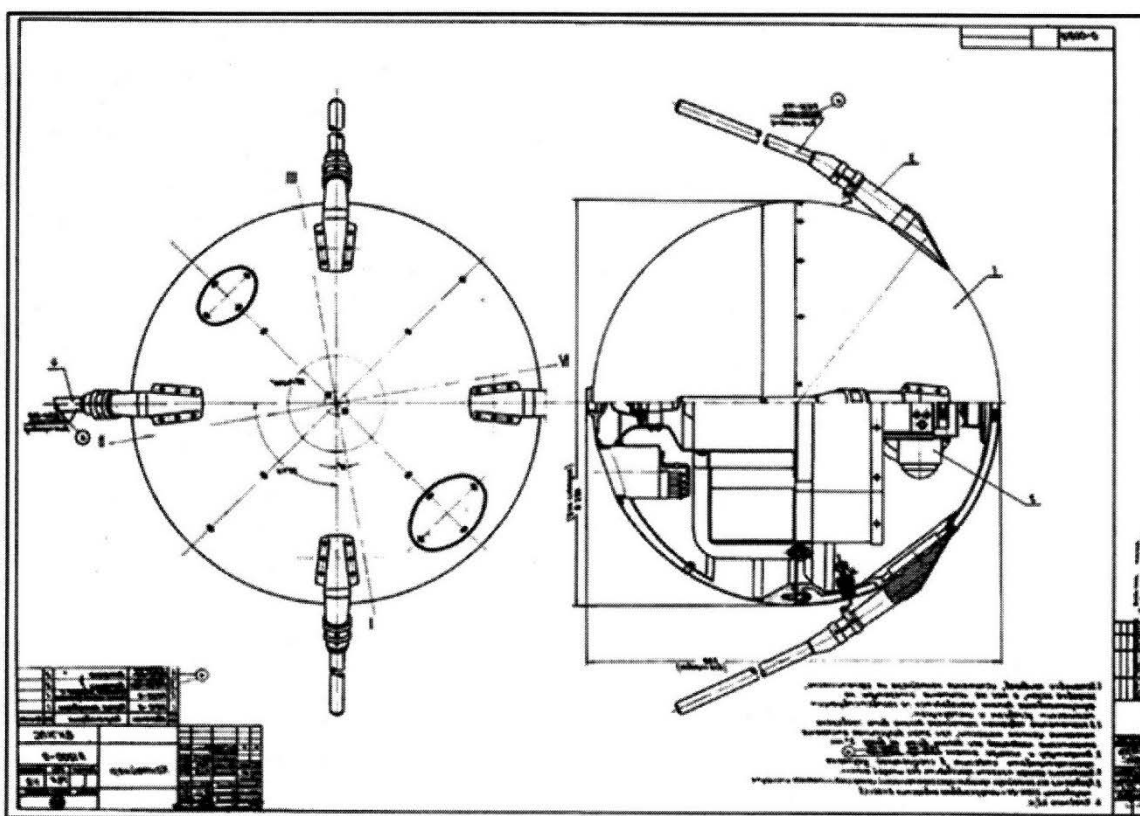
Установленные причины гипотетических отказов позволяют характеризовать отказоспособность МУ ОС при худших сочетаниях факторов, каждый из которых отдельно или в совокупности с другими факторами по каким-либо причинам не может быть реализован в результате имитации внешних условий эксплуатации при НЭО, возникновения предельных отклонений режимов эксплуатации и состояний конструктивно-технологического исполнения. Реестр полученных таким образом причин гипотетических отказов может служить контрольным списком (чек-листом) [213], в соответствии с которым осуществляется выбор значений внутренних параметров при решении уравнений (3.18) и устанавливаются требования в КД. Установление требований в конструкторской документации и выбор параметров (5.3) – взаимосвязанные процедуры.

Сами по себе внутренние параметры при проектировании (конструировании) служат количественными характеристиками свойств или способности проявления свойств критичных элементов. Снижение отказоспособности может быть достигнуто благодаря тому, что любая причина гипотетических отказов парируется конструкторскими и технологическими решениями путём наделения МУ ОС такими свойствами (способностями) их КЭ, при которых эти отказы становились бы невозможными в действительности. Значения каждого из параметров, характеризующих количественное выражение искомых свойств, определяются в результате решения уравнения (3.18) в виде

$$X_i \in [X_i^{\text{мин}}, X_i^{\text{макс}}],$$

что эквивалентно выражениям (3.21)–(3.22).

Алгоритм проведения подобного анализа конструкторских решений, направленного на достижение надёжности, показан на рис. 5.1. Приведённый здесь алгоритм анализа отличается от схемы обеспечения надёжности в течение ЖЦ (см. рис. 2.4) введением дополнительной процедуры определения функциональности изделия (5.3) как базовой при проведении анализов и обеспечении надёжности изделий с малой вероятностью отказов.



1. Функциональность:

$$X = (X_1 \dots X_n)^T \quad \forall i = \overline{1, n};$$

2. Работоспособность:

$$G = \{X_i | X_i^{\min} \leq X_i \leq X_i^{\max}\};$$

3. Надёжность:

$$P(t) = P[X_i(\tau) \in G, 0 \leq \tau \leq t]$$

Рис. 5.1. Алгоритм проведения анализа конструкторских решений, направленного на достижение надёжности

Любой чертёж может быть преобразован в параметрическую модель (2.63)–(2.86), описывающую функциональность, работоспособность и надёжность конструкции изделия. В результате указанного параметрического моделирования появляется возможность проведения вариационных изменений в конструкции на этапах создания 2D-проекций (чертежей) и 3D-моделей изделий, позволяющих избежать конструкторских ошибок и повысить тем самым уровень УВБР до максимально возможного, который только может быть потенциально достигнут данным конкретным конструктором исходя из его знаний, опыта и компетентности.

Любой параметр (показатель) в параметрической модели рассматривается как оцифрованное отображение требования КД, соответствующего проявлению того или иного свойства изделия при выполнении одной из заданных функций, равно как и каждое из этих требований соответствует одному из параметров (показателей), характеризующих заданную функциональность изделия согласно логической формуле

1 требование: \Leftrightarrow 1 параметр (показатель).

Установленные значения каждого из параметров (показателей) и их допусков должны соответствовать безусловному выполнению изделием соответствующих функций, способность выполнения которых определяется тем или иным требованием КД, равно как и выполнение любого из этих требований при изготовлении рассматривается как безусловное нахождение значений параметров (показателей) в заданных допусках.

Нахождение в установленных пределах значений параметров (показателей), характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях эксплуатации, подтверждается расчётами согласно логической формуле

*1 расчёт: \Leftrightarrow 1 обоснование нахождения параметра (показателя)
в заданном допуске.*

В контексте проведения КТАН под расчётом того или иного параметра понимается виртуальный эксперимент, в ходе которого:

- необходимо выбрать виртуальный объект испытаний и убедиться, что он соответствует реальному объекту;
- мысленно поместить виртуальный объект в заданные условия и режимы эксплуатации;
- убедиться с помощью математических вычислений или логических рассуждений, что выполнение требуемой функциональной задачи обеспечивается.

Подтверждение выполнения всех процедур конструкторско-технологического анализа рассматривается как обеспечение надёжности

вследствие безусловного выполнения установленных в КД требований согласно логической формуле

требование:

обосновано → установлено → выполнено → проконтролировано.

Выполнение алгоритма проведения анализа конструкторских решений согласно рис. 5.1 направлено на исключение ошибок при проектировании, конструировании и производстве. В идеальном случае конструкторские ошибки в результате анализов и проведения процедур по обеспечению надёжности могут быть устранены полностью, что создаёт предпосылки для достижения гарантоспособности как «*свойства системы, позволяющего обоснованно полагаться на выполнение задач, для которых она предназначена*» [214].

Обеспечение гарантоспособности изделия на стадиях разработки проектной и конструкторской документации (помимо достижения требуемой надёжности) позволяет повысить эффективность конструкторских разработок в соответствии с замечанием, высказанным в одном из стандартов европейской системы проектирования Eurocode: «*Следует отметить, что значение параметра надёжности является условным показателем вероятности отказов. Он используется скорее как средство для развития последовательных проектных правил, чем для описания частоты отказов конструкций*» [215]. При этом выполнение алгоритма проведения анализа конструкторских решений согласно рис. 5.1 позволяет одновременно решать две важные практические задачи.

Во-первых, каждый объект космической техники проходит стадию наземной экспериментальной отработки, в процессе которой объект испытаний подвергают нагрузкам и воздействиям, эквивалентным их эксплуатационным значениям. Значит, эту стадию можно рассматривать как прототип эксплуатации, соответствующую эксплуатации готового изделия (Эк) (см. рис. 4.7). К проведению НЭО можно относиться с двух точек зрения: как к способу выявления ошибок конструирования и как к проверкам, подтверждающим гарантоспособность изделия. В обоих случаях любой отказ при наземной отработке приводит к необходимости проведения комплекса мероприятий, препятствующих её продолжению из-за временной остановки испытаний, исследования причин отказа, поиска решений по доработке отказавших узлов, корректировки КД, доработки изделия и т. п. Мероприятия по устранению причин отказов при испытаниях удорожают стоимость проекта по созданию объектов космической техники. При этом устранение конструкторских ошибок «на кульмане», сразу же после их обнаружения, по формуле соотношения затрат на исправление ошибок при проектировании 1:10:100:1000 (проектирование – отработка – серийное

производство – эксплуатация) [34], способно существенно снизить расходы на проведение наземной отработки. Отсюда следует простой вывод: повышение качества анализов надёжности на ранних стадиях проектирования позволяет относиться к проведению НЭО как к процедуре подтверждения гарантоспособности изделий, что в конечном счёте снижает суммарные затраты на выполнение проекта. Кроме того, сами по себе наземные испытания не являются гарантией того, что изделие не откажет при эксплуатации. Они лишь подтверждают, что в данном состоянии изготовления и в заданных условиях проведения испытаний изделие продемонстрировало ожидаемую работоспособность, но не гарантируют, что уже следующее изделие в штатных условиях эксплуатации окажется работоспособным. Более того, даже успешная лётная квалификация изделия не гарантирует заданную надёжность. Вспомним пример с изделием, которое при ВБР 0,999 5 допускает отказы в 5 случаях из 10 000. При этом даже 9 995 успешных случаев эксплуатации подряд всё равно оставляют открытым вопрос по обеспечению заданной надёжности. Следовательно, для подтверждения надёжности изделий с малой вероятностью отказов проведение анализов, подтверждающих гарантоспособность, служит необходимым условием как с позиций сокращения временных, материальных и финансовых издержек при проведении испытаний, так и с позиций снижения рисков возникновения отказов при эксплуатации.

Во-вторых, для изделий с малой вероятностью отказов ключевое значение имеет соблюдение порядка выполнения стадий разработки КД [108]. Казалось бы, незначительное приращение УВБР на стадии разработки РКД (см. рис. 4.7) может послужить причиной отказов изделия в случае подмены стадии разработки ПКД стадией разработки РКД, а фактически исключения стадии разработки проектной документации из конструкторской подготовки производства. Отсутствие стадии разработки ПКД может вызвать нехватку времени на увязку требований ТЗ и устранение неизбежных конструкторских ошибок согласно формуле (2.36), что в конце концов способно привести к невыполнению заданных требований надёжности [216]. Формально компенсация отсутствующей стадии разработки проектной документации должна быть осуществлена на стадии разработки рабочей документации согласно положений НТД [108]: *«При невыполнении одной из стадий разработки, присущих опытно-конструкторской работам, работы, относящиеся к этим стадиям, должны быть осуществлены на одной из выполняемых стадий разработки»*. На практике же исключение стадии разработки ПКД приводит к выполнению конструкторской подготовки производства в укороченные вдвое сроки с негативными последствиями для качества разработанной КД. Выход из проблемной ситуации заключается только в создании методики анализа надёжности, позволяющей

снизить конструкторские ошибки. Проблемы с сокращением времени на разработку конструкторской документации актуальны при создании КА, осуществляемых, в первую очередь, на коммерческой основе [186]. Желание сэкономить на разработке КД может обернуться непредусмотренными затратами на доработку конструкций по результатам изготовления и испытаний в соответствии с правилом десятикратных затрат [34; 123], не говоря уже об убытках в случае отказов при эксплуатации.

5.3. Конструкторско-технологический анализ надёжности

Основную идею проведения КТАН можно свести к методам, подтверждающим выполнение четырёх взаимосвязанных процедур [204; 217]:

1) предоставление расчётно-экспериментальных доказательств того, что изделие не достигнет предельных состояний при функционировании (процедура обоснования параметров);

2) установление необходимых и достаточных требований в КД для изготовления изделия (процедура снятия неопределённостей);

3) изготовление изделия в точном соответствии с требованиями КД (процедура изготовления);

4) проверка выполнения требований КД (процедура проведения технического контроля).

Процедуры проведения КТАН осуществляется в следующем порядке:

- выявляются КЭ и конкретные причины, способные непосредственно породить их отказы в заданных условиях и режимах эксплуатации;

- устанавливаются свойства КЭ, обеспечивающие заданную работоспособность изделия в количестве, достаточном, чтобы полностью охарактеризовать любое из его состояний из условия недопустимости возникновения отказов (процедура парирования отказов);

- свойства, обеспечивающие работоспособность изделия, выражаются через соответствующие показатели или параметры, необходимые для однозначной характеристики его работоспособности и удобные для учёта рассматриваемых свойств (процедура параметрического моделирования или оцифровки конструкции);

- обосновываются критерии установления предельных значений показателей и параметров, при которых обеспечивается работоспособность изделия;

- устанавливаются предельные значения показателей или параметров;

- устанавливаются требования в КД, обеспечивающие безусловное исполнение заданных значений показателей и параметров;
- производится экспертиза ТД, направленная на выявление искажений и интерпретаций требований КД и на подтверждение их точного выполнения и контроля на производстве.

Императив КТАН заключается в определении потенциальных отказов изделий на стадиях конструкторской и технологической подготовки производства и выработки предложений по смягчению или устранению их последствий.

Предмет исследования КТАН – это **причины** отказов изделия как событий, заключающихся в нарушении его работоспособного состояния. Отказы при проведении КТАН квалифицируются исходя из качественных критериев в виде выявленных и формализованных признаков нарушения работоспособного состояния изделия, а также количественных критериев достижения заданными параметрами или показателями установленных пределов.

Под критерием работоспособного состояния изделия понимается выполнение условия (3.23) для каждого из значений параметров и показателей, характеризующих способность выполнять заданные функции, а критерием неработоспособного состояния изделия будет выполнение условия (3.24) хотя бы для одного значения параметра или показателя изделия.

Параметры и показатели рассматриваются как физические величины для определения требуемых свойств изделия, обеспечивающих выполнение заданных функций, а пределы изменения значений параметров и показателей определяют количественную меру их допустимого проявления. С позиций принципов осуществления КТАН использование каких-либо параметров и показателей для оценки работоспособности без увязки с требуемыми свойствами изделия недопустимо. Свойства изделий и их количественную оценку определяют на основе анализов выполнимости алгоритмов функционирования и/или кинетики физико-химических процессов.

Любой отказ порождается и обуславливается конкретной причиной. Такая причина согласно парадигме А.И. Уёмова становится возможной при критических отношениях элементов внутри изделия либо изделия к внешним объектам или к среде. В этом случае такие элементы или изделие в целом являются критичными к возникновению отказов.

Невозможность возникновения какого-либо отказа обуславливается таким свойством КЭ изделия, которое делает его причину неосуществимой. Проявление какого-либо из свойств критичных элементов выражается конкретными значениями параметров или показателей, пределы которых обеспечивают работоспособность изделия в заданных условиях и режимах эксплуатации.

Указанные выше принципы позволяют производить оцифровку конструкции изделия с помощью вектор-столбцов параметров (показателей) (5.3) и допусков (3.20). Блок-схема оцифровки конструкции по условиям работоспособности приведена на рис. 5.2. Использование блок-схемы позволяет составить подробную оцифрованную модель работоспособного изделия без пропусков той или иной количественной характеристики конструкции. Однако для обеспечения безотказности изделия этого недостаточно. Необходимо чтобы каждому из заданных значений параметров (показателей) (5.3) и их допусков (3.20) в КД были установлены требования, которые при изготовлении изделий должны быть в обязательном порядке выполнены и подтверждены.

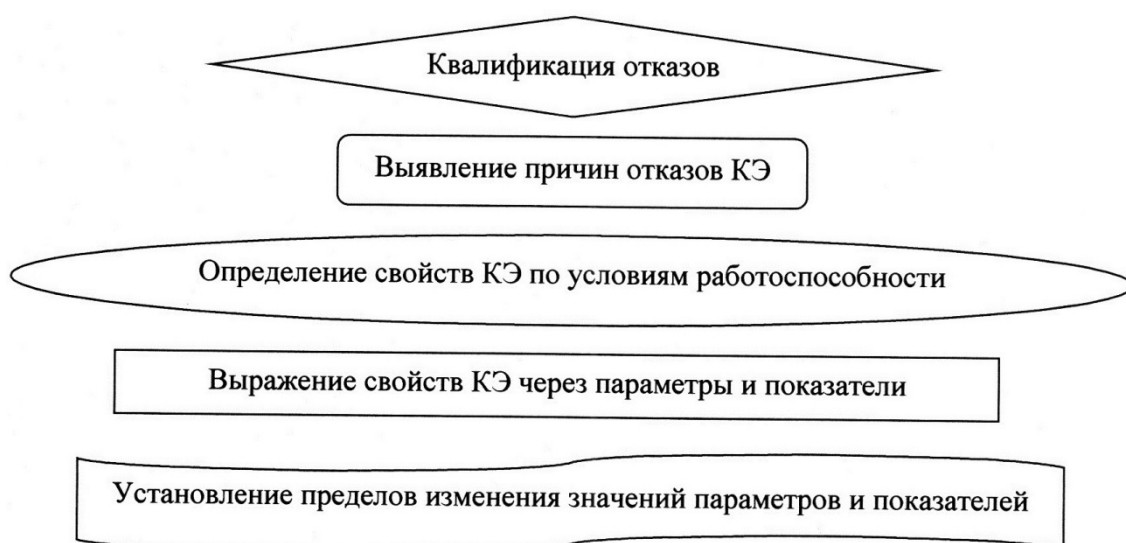


Рис. 5.2. Блок-схема оцифровки конструкции изделия

Конструктор задаёт требуемые свойства на основе параметров и показателей путём принятия и воплощения в КД технических решений, направленных на гарантированное выполнение изделием своего служебного назначения. Согласно определению терминов «работоспособное состояние» и «надёжность» [82] отказы не могут произойти, если параметры изделия, характеризующие способность выполнять заданные функции, соответствуют требованиям НТД и/или КД (ПКД) (согласно определению термина «работоспособное состояние»), сохраняют во времени установленные пределы своих значений в заданных режимах и условиях эксплуатации (применение, техническое обслуживание, хранение и транспортирование) (согласно определению термина «надёжность»).

Исходя из сказанного следует, что созданные в процессе проектирования, разработки и/или конструирования конструкторские документы должны:

- учитывать все параметры и показатели, характеризующие способность выполнять заданные функции;
- определять допустимые границы значений для каждого из параметров и показателей;
- обосновывать нахождение во времени каждого параметра и показателя в пределах допустимых значений в заданных режимах и условиях эксплуатации;
- устанавливать требования для изготовления, испытаний и эксплуатации изделий, обеспечивающие выполнение показателей и параметров в пределах своих допустимых значений.

На основании установленной номенклатуры и видов КД [149] необходимо, чтобы в чертежах, ТУ, таблицах, эксплуатационных документах и инструкциях были заданы параметры и показатели, характеризующие способность изделия выполнять заданные функции; в расчётах, согласно установленному перечню [218], были приведены обоснования нахождения во времени каждого из параметров и показателей в пределах допустимых значений в заданных режимах и условиях эксплуатации; в программах и методиках испытаний были отражены технические данные, подлежащие определению и проверкам.

Установленная номенклатура и виды конструкторских документов [148] позволяют:

- с помощью анализов и расчётов выявлять параметры и показатели, характеризующие способность изделия выполнять заданные функции, обосновывать выбор значений параметров и показателей, а также пределы их допустимых изменений;
- если для проведения расчётов недостает каких-либо данных, проводить соответствующие испытания (исследовательские, доводочные, предварительные, приёмочные и т. п.) [219];
- на основании расчётов и испытаний устанавливать в чертежах требования, необходимые для изготовления, сборки, монтажа и контроля, которые обеспечивают выполнение показателей и параметров в пределах своих допустимых значений.

Таким образом с помощью анализов, расчётов и испытаний может быть установлено соответствие оцифрованной модели и реальной конструкции изделия, после чего в КД должны быть заданы необходимые и достаточные требования для изготовления, сборки, монтажа и контроля, которые обеспечивают выполнение показателей и параметров в заданных пределах своих допустимых значений.

Блок-схема процедур обеспечения надёжности при конструировании представлена на рис. 5.3. При осуществлении процедур обеспечения надёжности при конструировании согласно блок-схеме могут быть получены

объективные доказательства и подтверждения реализуемости изделием заданных свойств путём исследования и оценки конструкторских решений для осуществления безотказной работы изделий.

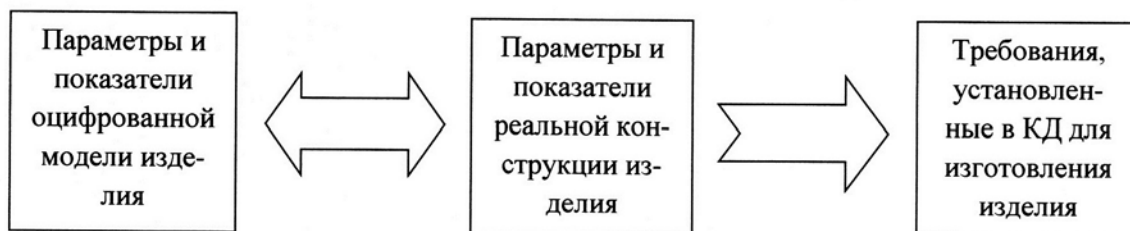


Рис. 5.3. Блок-схема процедур обеспечения надёжности при конструировании

Проведение конструкторско-технологического анализа надёжности возможно в процессе или после принятия определённых проектных и конструкторских решений для их обоснования или подтверждения. При его проведении принимается во внимание и учитывается максимально доступная информация об изделии, условиях и режимах его эксплуатации. КТАН направлен на выявление конкретных причин возможных отказов и принятие мер для их превентивного устранения или смягчения.

При проведении конструкторско-технологического анализа надёжности рассматриваются состояния изделий, процессы изменения этих состояний и выполняемые при этом функции, обеспечивающие их служебное назначение. Вероятность выполнения заданных функций является критерием работоспособности изделия. Невыполнение какой-либо из функций считается отказом. Каждый отказ обусловлен конкретной причиной, которая возникает, существует и развивается в заданных условиях и режимах эксплуатации изделия. Причиной отказа может служить как отдельный фактор, так и совокупность факторов, которая определяется исходя из худшего сочетания взаимоположения, взаимосвязей и взаимодействия КЭ в изделии.

Учёт и устранение возможных причин отказов строится на доказательной базе в виде результатов расчётов, подтверждающих сохранение во времени тех или иных свойств, обеспечивающих работоспособность изделия. Результаты таких расчётов служат основанием для установления требований, которые обязательны для выполнения и контроля на производстве. Необходимость и достаточность установленных в КД требований надёжности подтверждается выполнением конструкторской части КТАН. Необходимость и достаточность требований надёжности в ТД для выполнения и контроля на производстве подтверждается выполнением технологической части конструкторско-технологического анализа надёжности.

КТАН основан на принципах согласования конструкторских и технологических решений на всех стадиях ЖЦ – от технического замысла до выполнения целевой задачи. Согласно этим принципам конструктор, технолог и производитель обязаны с единых позиций предпринимать все необходимые меры по установлению и выполнению требований надёжности.

Объектами исследования при проведении КТАН будут конструкторская и технологическая документация в объеме требований к надёжности изделий, направленных на безусловное осуществление ими заданных функций.

Общие принципы, на основе которых проводится КТАН, заключаются в следующем:

1) надёжность изделия рассматривается как результат проявления свойств КЭ во взаиморасположении, взаимосвязи и взаимодействии;

2) свойства КЭ, обеспечивающие работоспособность изделия во времени, всегда могут быть обнаружены методами системного анализа, выражены через систему показателей и параметров и количественно определены соответствующими значениями;

3) любые виды расчётов, сопровождающие проектно-конструкторские работы, служат для обоснования установления требований КД. При решении задач надёжности такие расчёты проводятся для количественной оценки значений тех или иных параметров либо показателей, выполнение которых обеспечивает работоспособное состояние изделия;

4) установленные в КД требования должны быть в обязательном порядке выполнены при изготовлении ДСЕ, сборке, монтаже и испытании изделий, а также проконтролированы службой технического контроля на производстве;

5) одновременное исполнение условий по обоснованию, установлению, выполнению и контролю выполнения конструкторско-технологических требований служит гарантией обеспечения заданной надёжности.

Сам по себе КТАН служит одним из методов анализа надёжности, который проводится в неразрывной связке с другими видами анализов:

- для квалификации отказов проводится ФА, результаты которого являются исходными данными для проведения КТАН;

- для проведения КТАН требуется получить максимально полное представление об условиях возникновения отказов как среде, где они возникают, существуют и развиваются, и выявить конкретные причины, способные непосредственно их породить. Для определения условий возникновения отказов используется АХС, результаты которого также будут исходными данными для проведения КТАН;

- результаты КТАН служат исходными данными для проведения АН на соответствие заданному уровню надёжности изделия.

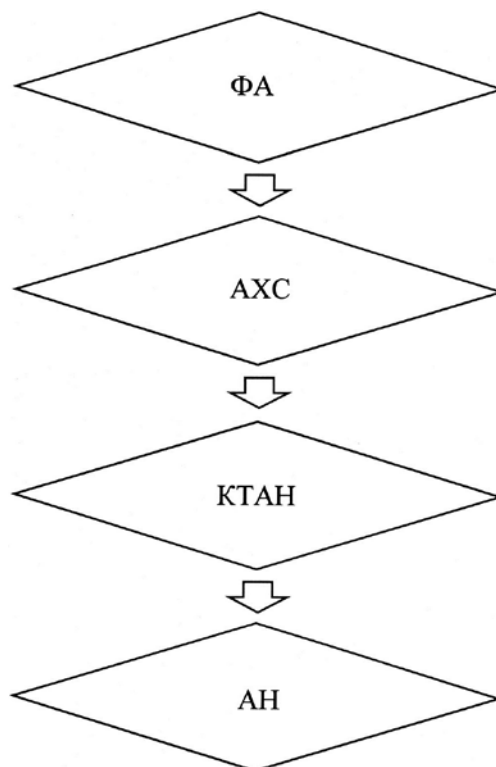


Рис. 5.4. Алгоритм проведения анализов надёжности с применением КТАН

Алгоритм проведения анализов надёжности с применением КТАН приведён на рис. 5.4.

В результате проведения вспомогательных анализов (ФА и АХС) производится квалификация отказов изделия и выявляются условия их возникновения в виде воздействия отдельных неблагоприятных факторов или их сочетаний исходя из заданных условий и режимов их эксплуатации.

Расчётный обобщённый показатель надёжности определяют путём аддитивного учёта результатов всех видов анализов. Заключение о надёжности изделия делают на основании сравнения расчётного показателя надёжности с заданным (3.8).

5.3.1. Функциональный анализ

Цель проведения функционального анализа в контексте применения КТАН немногим отличается от целей ФА, используемого при анализах надёжности оборудования, систем и КА. Это определение влияния потери отдельных функций на работоспособность изделий, а также определение по каждой функции критериев допустимых потерь и общего критерия отказа изделий [220]. Однако методика проведения функционального анализа раскрывающихся конструкций имеет свою специфику.

РК относятся к механическим системам (устройствам), которые способны одновременно или последовательно проявлять себя как *«системы (элементы) с механическими движущимися частями и ... системы (элементы) без механических движущихся частей»* [152]. В сложенном положении (в первом стационарном состоянии) РК есть *«системы без механических движущихся частей»*; при раскрытии (в переходном или подвижном состоянии) – *«системы с механическими движущимися частями»*; в раскрытом (рабочем) положении (во втором стационарном состоянии) – *«системы без механических движущихся частей»*. Пребывание в любом из указанных состояний не должно приводить к ухудшению работоспособности РК. Переход из одного состояния в другое без нарушения работоспособности рассматривается как функционирование, т. е. процесс выполнения функций. Функция понимается как некоторое условие или роль чего-либо (элементов, узлов, конструкций) при выполнении служебного назначения РК.

Согласно своему терминологическому определению [82] работоспособность элементов, находящихся в процессе функционирования в стационарных и в переходных состояниях, можно учитывать по отдельности как *«выполнение в объекте (системе) процесса (процессов), соответствующего (соответствующих) заданному алгоритму»*, т. е. поведение элементов с механическими движущимися частями в переходных состояниях; *«выполнение в объекте (системе) процесса (процессов), соответствующего (соответствующих) проявлению объектом заданных свойств»*, т. е. поведение элементов без механических движущихся частей в стационарных состояниях: в стартовом и рабочем положениях.

Такое понимание процесса функционирования позволяет разукрупнять функции РК до характеристики их в каждом из состояний (в двух стационарных и одном переходном), а также в пограничных состояниях (между первым стационарным состоянием и переходным и между переходным состоянием и вторым стационарным). Разукрупнение функций подобным образом позволяет обобщить отказы как события, связанные с нарушением работоспособного состояния, по смыслу, содержанию и назначению событий, происходящих в каждом из функциональных состояний. Функции, определённые указанным образом, целесообразно именовать главными функциями, поскольку определение терминов «функция» и «функционирование» не накладывает ограничений на степень разукрупнения РК вплоть до любого порядка малости её элементов. Ранжирование отказов по главным функциям позволяет проводить КТАН элементов конструкций с единых по смыслу позиций. Разукрупнение функций элементов в рамках каждой из главных функций даёт возможность анализировать РК с позиций «проявления объектом заданных свойств» на уровне элементов любого порядка малости.

Важно отметить, что в общем случае количество главных функций любой РК не может превышать пяти, которые характеризуют три основных и два пограничных состояния. В то же время количество главных функций, принятых во внимание при проведении КТАН, может быть и меньше пяти, что определяется функциональностью, т. е. набором возможностей (функций), которые предоставляет данная конкретная РК.

Функциональность любой РК в общем случае можно определить главными функциями.

1) Функция 1 – удержание изделия в сложенном положении вплоть до момента начала развёртывания (т. е. выполнение определённых условий перед началом раскрытия, заключающихся в сохранении способности обеспечить безотказность развёртывания изделия – функционирование в первом стационарном состоянии).

Фактически при выполнении функции 1 речь идёт о сохраняемости – *«свойстве объекта сохранять значения показателей безотказности, долговечности и ремонтпригодности в течение и после хранения и (или) транспортирования»* [191]. В расширенной трактовке понятие «транспортирование» – *«перемещение продукции в заданном состоянии...»* [141], в том числе после осуществления проверок функционирования при раскрытиях в процессе проведения наземных испытаниях.

2) Функция 2 – освобождение изделия от механических связей (разделение) с опорным основанием перед раскрытием в рабочее положение (т. е. выполнение подготовительной фазы раскрытия, без которой невозможно начало движения – функционирование в первом пограничном состоянии).

3) Функция 3 – разворот изделия на заданный угол или (и) перемещение на заданное расстояние (т. е. выполнение основной фазы раскрытия, заключающейся в осуществлении движения – функционирование в переходном состоянии).

4) Функция 4 – фиксация изделия в рабочем положении (т. е. обеспечение выполнения завершающей фазы раскрытия, характеризующейся преодолением максимальных пиковых сопротивлений в течение малых относительных перемещений при минимальных движущих усилиях приводов – функционирование во втором пограничном состоянии);

5) Функция 5 – обеспечение заданных параметров прочности и позиционирования изделия в рабочем положении (т. е. выполнение определённых условий после завершения раскрытия, связанных, например, с обеспечением условий прочности, точности, допустимых люфтов в ШУ – функционирование во втором стационарном состоянии).

Функция 5 обеспечивает выполнение параметров прочности и позиционирования непосредственно после фиксации РК в рабочее положение,

в отличие от параметров прочности и позиционирования, которые обеспечиваются после длительного пребывания в условиях ФКП.

Исход выполнения каждой из главных функций определяется событием. Функционирование РК рассматривается как осуществление последовательных событий, связанных с изменением состояния конструктивных элементов. Например, для штанги (рис. 2.3) события, происходящие при функционировании, в самом общем случае включают:

- событие Y_1 – штанга в стартовом положении φ_n не разрушится после воздействия на неё внешних нагрузок в процессе полёта РН;
- событие Y_2 – программное снятие механических связей в замке, удерживающих штангу в стартовом положении φ_n ;
- событие Y_3 – разворот штанги на угол φ с требуемыми параметрами движения;
- событие Y_4 – фиксация углового положения штанги при достижении заданного угла поворота φ_k ;
- событие Y_5 – конструкция штанги при фиксации заданного углового положения не разрушится.

Полная надёжность штанги при раскрытии из стартового положения в рабочее положение является вероятностью пересечения событий Y_1 – Y_5 :

$$P = P(Y_1 \cap Y_2 \cap Y_3 \cap Y_4 \cap Y_5) \quad (5.4)$$

либо

$$P = P(Y_1) \cdot P(Y_2|Y_1) \cdot P(Y_3|Y_1 \cap Y_2) \times \\ \times P(Y_4|Y_1 \cap Y_2 \cap Y_3) \cdot P(Y_5|Y_1 \cap Y_2 \cap Y_3 \cap Y_4). \quad (5.5)$$

События Y_1 – Y_5 – это общая схема выполнения задач при эксплуатации штанги, т. е. последовательное осуществление таких фаз изменения состояний:

- подготовительной перед раскрытием (сопротивление внешним нагрузкам в стартовом положении);
- подготовительной фазы раскрытия (обеспечение полного освобождения от механических связей с опорным основанием перед раскрытием в рабочее положение);
- основной фазы раскрытия (развёртывание на заданный угол в рабочее положение);
- завершающей фазы раскрытия (фиксация в рабочем положении);
- заключительной – после завершения раскрытия (сохранение прочности в рабочем положении при фиксации).

Если РК, в частности штангу (см. рис. 2.3), структурно представить, как взаимосвязанный набор механизмов, то для каждого из них в общем случае также применима указанная функциональность. Например, если

при закреплении штанги используется держатель (см. рис. 3.1), то процесс его срабатывания и высвобождения закрепляемого элемента конструкции штанги можно представить как осуществление последовательных случайных событий, связанных с изменением состояния конструктивных элементов держателя, включающих:

- событие $Y_1^д$ – держатель в стартовом положении после воздействия на него внешних нагрузок в процессе полёта РН не разрушится и не получит недопустимых деформаций (подготовительная фаза перед началом срабатывания держателя);
- событие $Y_2^д$ – программное нарушение условия равновесия механизма держателя (подготовительная фаза срабатывания держателя);
- событие $Y_3^д$ – разворот звеньев механизма держателя на заданный угол, обеспечивающий беспрепятственное высвобождение удерживаемого элемента конструкции штанги в направлении Б (основная фаза срабатывания держателя);
- событие $Y_4^д$ – фиксация звеньев держателя после достижения заданного угла поворота за счёт поджатия их к опорному основанию раскрывающей пружины (завершающая фаза срабатывания держателя);
- событие $Y_5^д$ – конструкция держателя при срабатывании не разрушится (заключительная фаза после завершения срабатывания держателя).

Аналогично формуле (5.4) надёжность срабатывания держателя определяется вероятностью пересечения событий $Y_1^д - Y_5^д$:

$$P^д = P(Y_1^д \cap Y_2^д \cap Y_3^д \cap Y_4^д \cap Y_5^д). \quad (5.6)$$

Формулы (5.4) и (5.6) описывают функциональную схему раскрытия РК любого типа и разного уровня иерархии. Например, держатель является элементом низшего уровня иерархии конструкции штанги, пиростроительство – элементом низшего уровня иерархии конструкции держателя. В частности, формула (5.6) описывает взаимосвязь разукрупнённых событий, которые составляют событие Y_2 , заключающееся в программном снятии механических связей, удерживающих штангу в стартовом положении φ_n (см. рис. 2.3), при этом надёжность срабатывания держателя $P^д$ эквивалентна вероятности осуществления события Y_2 :

$$P^д = P(Y_2).$$

В то же время с учётом (5.5) для оценки надёжности срабатывания держателя можно использовать формулу

$$P^{\text{д}} = P(Y_1^{\text{д}}) \cdot P(Y_2^{\text{д}} | Y_1^{\text{д}}) \cdot P(Y_3^{\text{д}} | Y_1^{\text{д}} \cap Y_2^{\text{д}}) \times \\ \times P(Y_4^{\text{д}} | Y_1^{\text{д}} \cap Y_2^{\text{д}} \cap Y_3^{\text{д}}) \cdot P(Y_5^{\text{д}} | Y_1^{\text{д}} \cap Y_2^{\text{д}} \cap Y_3^{\text{д}} \cap Y_4^{\text{д}}),$$

которую с учётом (2.11) можно записать как:

$$P^{\text{д}} = P(Y_{\text{ф}}^{\text{д}}) \cdot P(Y_{\text{п}}^{\text{д}}) = P_{\text{ф}}(Y_2^{\text{д}} \cap Y_3^{\text{д}} \cap Y_4^{\text{д}}) \cdot P_{\text{п}}(Y_1^{\text{д}} \cap Y_5^{\text{д}}), \quad (5.7)$$

либо с учётом (2.20) преобразовать к виду

$$P^{\text{д}} = \prod_{i=1}^5 P_i^{\text{д}}, \quad (5.8)$$

здесь $P_i^{\text{д}} = P(Y_i^{\text{д}})$.

Поскольку событие $Y_2^{\text{д}}$ – программное нарушение равновесия механизма держателя – зависит от вероятности снятия усилия натяжения тросовой связи, то вероятность его совершения в формуле (5.8) является условной:

$$P_2^{\text{д}} = P(Y_2^{\text{д}} | Y^{\text{тп}}), \quad (5.9)$$

где $Y^{\text{тп}}$ – событие, заключающееся в снятии усилия натяжения тросовой связи 11 (см. рис. 3.1).

Физический смысл представления (5.6) с помощью формул (5.7) и (5.9) заключается в необходимости разделения различных по природе событий, характеризующихся разными предельными состояниями. Например, событие $Y_{\text{ф}}^{\text{д}}$ может произойти, если энергии пружины (10) (см. рис. 3.1) будет достаточно для перевода звеньев механизма держателя из стартового (зачекованного) положения в конечное (расचेкованное), что следует из (5.7). В то же время условием для начала осуществления события $Y_{\text{ф}}^{\text{д}}$ является снятие усилия натяжения тросовой связи (событие $Y^{\text{тп}}$), что следует из (5.9).

Разделение события $Y_{\text{ф}}^{\text{д}}$ в формуле (5.7) на составляющие его события $Y_2^{\text{д}} - Y_4^{\text{д}}$ производится из-за того, что в начальной фазе срабатывания держателя требуется преодолеть силы трения покоя, для чего необходимо больше энергии приводов, чем в основной фазе срабатывания. В заключительной фазе срабатывания держателя требуется обеспечить однозначность позиционирования положения его механизмов для осуществления условия беспрепятственного выхода элемента (7) (см. рис. 3.1) из зоны возможного зацепления с элементами конструкций держателя.

Снятие усилия натяжения тросовой связи осуществляется при срабатывании инициатора, вызывающего разъединение (снятие) силовой связи в держателе (см. рис. 3.1) после подачи соответствующей команды (электрического сигнала), в качестве которого может быть использована пирочка (рис. 5.5). Она состоит из корпуса (2), в котором установлен пиропатрон (1). Внутри корпуса (2) последовательно помещены поршень (3) с уплотнительным кольцом (4) и втулка (5), через которую пропущена шпилька (6) с фиксирующими её гайками (7). К шпильке (6) может быть прикреплен трос (на рис. 5.5 трос не показан), который удерживает держатель (см. рис. 3.1) от срабатывания. При подрыве пиропатрона (1) пороховые газы поступают во внутреннюю полость поршня (3), который давит на втулку (5) и срезает шпильку (6). После среза шпильки (6) натяжение троса ослабевает, что позволяет держателю сработать.

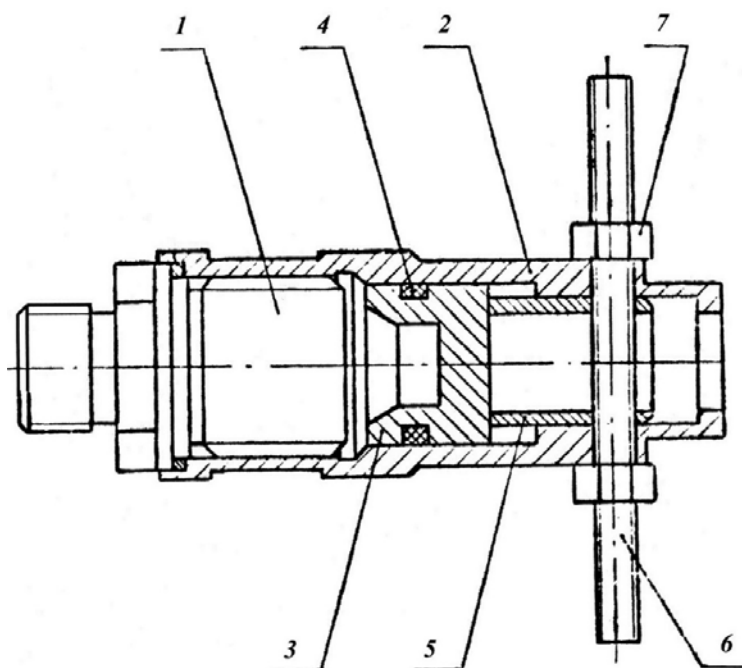


Рис. 5.5. Принципиальная конструктивная схема пирочки

Процесс снятия натяжения тросовой связи в держателе можно представить как осуществление последовательных универсальных событий по аналогии с формулами (5.4) и (5.6), которые в случае использования пирочки в качестве инициатора срабатывания в общем виде могут включать:

- событие Y_1^{TP} – пиропатрон не воспламенится до момента подачи специальной команды, например, не произойдет несанкционированного срабатывания пиропатрона при электростатическом пробое (подготовительная фаза перед началом срабатывания пирочки);

- событие Y_2^{TP} – воспламенение пиропатрона по команде и создание давления пороховых газов, достаточного для перемещения поршня пирочеки (подготовительная фаза срабатывания пирочеки);
- событие Y_3^{TP} , заключающееся в срезе шпильки (снятии чеки) при движении поршня под действием пороховых газов (основная фаза срабатывания пирочеки);
- событие Y_4^{TP} – снятие механических связей между тросом и пирочеккой (завершающая фаза срабатывания пирочеки);
- событие Y_5^{TP} , заключающееся в том, что окажутся соблюдены условия незацепления или непрепятствования протяжке тросовых связей (ключительная фаза завершения срабатывания пирочеки).

При описании событий, сопровождающих работу РК, важно помнить, что общая схема чередования событий, присущая определённым сменяющимся условиям и фазам срабатывания, не исключает детализацию каждого из событий, что зависит от исполнения конструкции и физических основ её реализации. В частности, любое из событий $Y_1^{\text{TP}} - Y_5^{\text{TP}}$ может быть представлено более мелкими событиями. В то же время отметим разницу между событиями Y_5^{TP} и $Y_2^{\text{Д}}$. Первое из событий (Y_5^{TP}) определяет условие снятия усилия натяжения тросовой связи, когда освобожденный трос при штатном срабатывании пироустройства не может сдвинуться с места, например из-за попадания клея в процессе монтажа и сборки между корпусом (2) и гайкой (7) (см. рис. 5.5). Второе же событие ($Y_2^{\text{Д}}$) определяется усилием протяжки троса в системе зачековки нескольких замков, которые срабатывают от одной пирочеки (см. рис. 1.5), при условии штатного срабатывания пирочеки и отсутствии внешних препятствий на пути перемещения троса.

Таким образом, событие Y^{TP} в формуле (5.9) можно представить в виде

$$Y^{\text{TP}} = Y_1^{\text{TP}} \cap Y_2^{\text{TP}} \cap Y_3^{\text{TP}} \cap Y_4^{\text{TP}} \cap Y_5^{\text{TP}}.$$

Отдельные главные функции при проведении ФА могут не рассматриваться, если по какой-то причине выполнение функции не влияет на надёжность (например, функции, связанной с осуществлением события $Y_5^{\text{Д}}$, если элементы конструкции замка деформируются после срабатывания, то штанга всё равно раскроется) или выполнение функции рассматривается на более мелком уровне разукрупнения (например, функции, связанной с осуществлением события Y_2) либо выполнение функции делегировано механизму, имеющему заведомо (очевидно) высокий уровень надёжности

(например, состоящему из конструктивных элементов с запасом прочности намного превышающим 1).

По каждой из главных функций определяют критерии допустимых потерь и формулируют понятие отказа как события, приводящего к потере работоспособности.

ФА начинается с описания конструкции, которое должно включать:

- определение предназначения изделия;
- составление конструктивных, структурных, функциональных и иных схем, необходимых для иллюстрации работы изделия;
- описание назначения каждого элемента конструкции изделия в рамках обеспечения его работоспособного состояния;
- описание порядка функционирования;
- перечисление основных характеристик, которые определяют работоспособное состояние изделия;
- рассмотрение участвующих в функционировании элементов конструкции с позиций выполняемых ими функций в каждом из возможных состояний.

Описание конструкции, с одной стороны, является формальной процедурой, но с другой – ошибки в понимании логики функционирования неизбежно влекут за собой ошибки в результатах анализов.

Вспомогательные элементы и узлы изделия, обеспечивающие его исправное состояние, при проведении ФА не рассматриваются. Например, функционирование телеметрических датчиков конечных положений элементов конструкции при проведении ФА изделия не учитывается, поскольку с позиций работоспособного состояния изделия в целом, функционирование телеметрических датчиков рассматривается в исправном состоянии. Это не исключает проведения ФА телеметрических датчиков, как самостоятельной задачи при анализе их надёжности по целевому назначению.

На основании составления описания конструкции устанавливаются главные функции РК, критерии допустимых потерь и отказов.

Модель функционирования РК при раскрытии может быть представлена в виде структурной схемы надёжности, в которой реальные конструктивные элементы заменяются фиктивными элементами в виде последовательно или параллельно соединённых звеньев.

5.3.2. Анализ худшего случая

Цель проведения АХС не отличается от подобного анализа, изложенного в работе [220], в части подтверждения того, что расчётная ВБР не будет ниже требуемой при возможных сочетаниях худших комбинаций внешних воздействий и режимов работы.

Отличия АХС в контексте применения КТАН заключаются в следующем:

- данный анализ проводится до начала проведения КТАН, так как его результаты служат исходными данными для выявления условий и причин возможных отказов;
- при проведении анализа учитывается не просто чувствительность к условиям внешней среды, а чувствительность к комплексу худших комбинаций внешних воздействий, режимов работы, изменений и деградаций физико-механических характеристик материалов, исполнения геометрических размеров деталей и сборочных единиц, возникающих при неблагоприятном сочетании взаимоположений, взаимосвязей и взаимодействий КЭ.

Например, проведение АХС при оценке радиального зазора в шарнире должно быть нацелено на подтверждение сохранения зазора в течение срока эксплуатации с учётом всех возможных отклонений сопрягаемых размеров шарнирной пары в пределах допусков на изготовление, максимальной толщины твёрдо-смазывающего покрытия и максимальных тепловых деформаций в результате воздействия внешних условий (2.59). При проведении анализа худшего случая коммутационных электрических кабелей в подвижных узлах должны быть определены не только значения резистивных сил при аномально высоких и аномально низких температурах, но и оценены вероятности зацеплений петель кабеля за элементы конструкций при трансформировании конструкций и вероятности повреждения смежных конструкций при вибрациях.

Результаты АХС служат исходными данными для проведения конструкторско-технологического анализа надёжности в части выявления своего рода расчётных случаев при определении надёжности, для которых должны быть «сложены» вместе неблагоприятные варианты возможных нагрузок и воздействий в сочетании с худшим исполнением конструкции изделия. Такие случаи должны быть в обязательном порядке учтены в расчётах индивидуальных параметров изделия и при установлении конструкторских требований.

Исходными данными для проведения АХС являются требования работоспособности изделия, действующие нагрузки, воздействия и условия выполнения критичных функций.

5.3.3. Анализ (оценка) надёжности

Для изделий с малой вероятностью отказов оценка надёжности проходит в два этапа на основе результатов, полученных при проведении КТАН:

- проводятся необходимые расчёты (оценки) для подтверждения вероятности нахождения каждого из параметров и показателей изделия в за-

данном допуске по формуле (4.14) и обобщённого показателя надёжности по формуле (2.20) (этап расчётного обоснования параметров конструкции при выполнении проектно-конструкторских работ);

- даётся оценка надёжности изделия с учётом выполнения алгоритма КТАН, который приведён на рис. 5.4 (этап расчётного обоснования по снятию неопределённостей состояния конструкции при изготовлении).

Все расчёты, подтверждающие вероятность нахождения параметров (показателей) в заданном допуске, должны быть выполнены при разработке КД до начала проведения КТАН. Если такие расчёты для подтверждения того или иного параметра по какой-либо причине не сделаны, то они должны быть выполнены в ходе проведения КТАН. Цель этих расчётов заключается в обоснованном выборе или подтверждении параметров конструкции. Поскольку при оценке надёжности изделий с малой вероятностью отказов необходимо кроме параметров оценивать показатели, то расчёты должны рассматриваться в расширенном толковании значения этого слова от *«установления и подсчёта необходимых данных при проектировании»* до *«предположений, основанных на учёте каких-либо обстоятельств»* [48]. Такие расчёты проводят по методикам, которые в наибольшей степени пригодны для этого (на прочность и жёсткость в стартовом и в рабочем положениях, тепловые расчёты, расчёты размерных цепей, запасов движущих моментов, заданной зоны раскрытия, заданной последовательности раскрытия, времени раскрытия, допустимых угловых скоростей в момент фиксации в рабочем положении и т. п.) и любыми приемлемыми методами: детерминированными, полувероятностными или вероятностными [221]. Если для расчётов окажется недостаточно исходных данных (величин, параметров, характеристик и т. п.), то необходимо провести соответствующие испытания для получения недостающих данных. Например, если необходимо убедиться, что перемещения транзитного электрического кабеля при вибрациях или в условиях невесомости не приведут к зацеплениям при повороте конструкции (см. рис. 3.12 и рис. 3.13), то следует провести испытания на макете поворотного узла по принудительному отклонению петли кабеля (буквально перемещая её руками) с целью подтверждения того, что зацепления исключены. В качестве оценки ВБР какого-либо конструктивного элемента могут служить статистические испытания (2.4), например испытания на надёжность срабатывания пиропатронов. Проведение подобных испытаний согласно соответствующим программам и методикам предусмотрено в ГОСТ 2.102 [148] наряду с испытаниями по контролю качества и приёмке продукции по ГОСТ 15.309 [222].

Все расчёты параметров (показателей) изделия производят итерационно – по мере проработки и детализации конструкции при разработке, например, начиная с аналитических расчётов на прочность по балочным

схемам и заканчивая численными расчётами полноразмерных 3D-моделей методами конечных элементов. Именно эту процедуру при проведении прочностных расчётов стационарных (не реконфигурируемых) конструкций принято считать расчётами на надёжность, если они выполняются по-лувероятностными или вероятностными методами [223]. Для КА и отдельных его отсеков, узлов и агрегатов рекомендуемый порядок проведения расчётов на прочность от нагрузок активного участка предусмотрен стандартом [90].

В отличие от расчётов надёжности стационарных конструкций, одним из основных видов расчётов МУ ОС является расчёт надёжности по функционированию при раскрытии (2.19), для проведения которого производят расчёты движущих моментов и моментов сил сопротивления (2.18), а также запасов движущих моментов (сил) (2.24)–(2.25) с применением методов статики (кинетостатики) либо обобщённых запасов движущих моментов (4.31) с учётом динамики раскрытия и прочности. Приведём пример расчёта на срабатывание держателя (см. рис. 3.1), расчётная схема которого приведена на рис. 5.6.

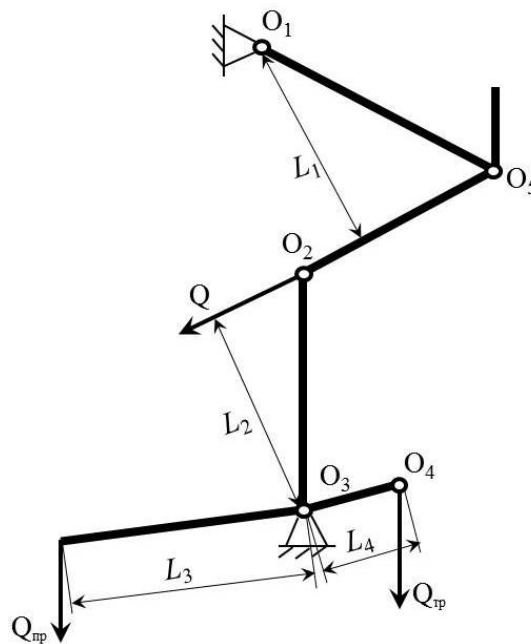


Рис. 5.6. Расчётная схема держателя

Момент движущих сил относительно оси O_1 шарнира опорного основания колодки равен

$$M_{\text{дв}}(O_1) = Q \cdot L_1, \quad (5.10)$$

где Q – сила, поворачивающая колодку относительно оси O_1 ; L_1 – плечо действия силы Q относительно оси O_1 .

Сила Q определяется по формуле

$$Q = \frac{M_{\text{дв}}(O_3)}{L_2},$$

где $M_{\text{дв}}(O_3)$ – момент, создаваемый пружиной раскрытия относительно оси O_3 ; L_2 – плечо действия силы Q относительно оси O_3 .

Момент, создаваемый пружиной раскрытия относительно оси O_3 , равен

$$M_{\text{дв}}(O_3) = Q_{\text{пр}} \cdot L_3, \quad (5.11)$$

где $Q_{\text{пр}}$ – усилие пружины раскрытия; L_3 – плечо действия силы $Q_{\text{пр}}$ относительно оси O_3 .

Минимальное значение момента движущих сил $M_{\text{дв}}$ относительно оси O_1 при срабатывании держателя определяется исходя из худшего сочетания линейных размеров звеньев держателя с учётом допусков, механических характеристик материала пружины при заданных условиях ФКП, усилий пружины по диаграмме с учётом допусков и изменения длины в результате поворота кривошипа.

Момент сил сопротивления повороту M_c относительно оси O_1 определяется по формуле

$$M_c(O_1) = Q \cdot (r_1 \cdot \mu_1 + r_2 \cdot \mu_2 + r_5 \cdot \mu_5) + M_c(O_3), \quad (5.12)$$

здесь

$$M_c(O_3) = Q_{\text{тр}} \cdot (L_4 + r_4 \cdot \mu_4) + (Q_{\text{тр}} + Q_{\text{пр}}) \cdot r_3 \cdot \mu_3, \quad (5.13)$$

где $M_c(O_3)$ – момент сил сопротивления повороту M_c относительно оси O_3 ; r_i – радиусы шарниров в соответствующих осях; μ_i – коэффициенты трения в соответствующих шарнирах; $Q_{\text{тр}}$ – усилие протяжки троса в оболочке Бодена (гибкой трубке, закрепленной на концах); L_4 – линейный размер рычага, на котором действует сила $Q_{\text{тр}}$.

Максимальные значения моментов сил сопротивления M_c при срабатывании держателя определяются исходя из максимальных размеров осей шарниров, максимальных значений коэффициентов трения и максимального усилия протяжки троса в боденовской оболочке при заданных условиях ФКП.

Для обеспечения работоспособности держателя в каждом шарнире при неблагоприятном сочетании параметров, определяющих движущие моменты и моменты сил сопротивления, с учётом (5.10)–(5.13) должно соблюдаться условие

$$M_{\text{дв}} / M_c > 1,$$

соответственно

$$\frac{M_{\text{дв}}(O_1)}{M_c(O_1)} > 1 \text{ и } \frac{M_{\text{дв}}(O_3)}{M_c(O_3)} > 1.$$

Для количественной оценки надёжности срабатывания держателя, как правило, используют предположение о нормальном законе распределения моментов движущих сил и моментов сил сопротивления и их независимости, в результате чего формула (2.19) с учётом (5.7) может принять следующий вид:

$$P_{\phi}^{\text{д}} = F^* \left(\frac{m_{M_{\text{дв}}} - m_{M_{\text{с}}}}{\sqrt{D_{M_{\text{дв}}}^2 + D_{M_{\text{с}}}^2}} \right), \quad (5.14)$$

где F^* – функция нормированного нормального распределения [96]; $m_{M_{\text{дв}}}$, $D_{M_{\text{дв}}}$ – математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение моментов движущих сил; $m_{M_{\text{с}}}$, $D_{M_{\text{с}}}$ – математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение моментов сил сопротивления.

Числовые характеристики движущих моментов и моментов сил сопротивления могут быть определены с помощью схемы измерений, показанной на рис. 2.7.

Среднеквадратические отклонения $D_{M_{\text{дв}}}$, $D_{M_{\text{с}}}$ в (5.14) определяются по формулам

$$D_{M_{\text{дв}}} = \frac{M_{\text{дв}}^{\text{ср}} - M_{\text{дв}}^{\text{мин}}}{Z},$$

$$D_{M_{\text{с}}} = \frac{M_{\text{с}}^{\text{ср}} - M_{\text{с}}^{\text{макс}}}{Z},$$

где $M_{\text{дв}}^{\text{мин}}$ – минимальное значение момента движущих сил; $M_{\text{с}}^{\text{макс}}$ – максимальное значение момента сил сопротивления; $M_{\text{дв}}^{\text{ср}}$, $M_{\text{с}}^{\text{ср}}$ – среднеарифметические значения моментов движущих сил и сопротивления; Z – квантиль, соответствующий заданному доверительному уровню надёжности.

Примеры расчётов запасов движущих моментов (сил) для разных элементов конструкции и типов МУ ОС приведены в работах [28–30; 91].

Завершающей процедурой расчётов параметров (показателей) МУ ОС в целом при проведении проектно-конструкторских работ является расчёт обобщённого показателя надёжности (2.20), который отражает идеальный (безошибочный) результат разработки МУ ОС и служит проектным (желаемым) уровнем надёжности (2.33).

При выполнении конструкторско-технологических работ для расчёта обобщённого показателя надёжности необходимо учитывать результаты проведения КТАН. Невыполнение, ненадлежащее выполнение или отсут-

ствие документального подтверждения о выполнении хотя бы одной из процедур КТАН, несмотря на положительные результаты расчётов параметров (показателей) и обобщённого показателя надёжности (2.20), способно привести к неоправданному риску возникновения отказов. Проявление или непроявление заданных свойств КЭ рассматривается как событие. Вероятность совершения каждого из таких событий $P(C_i)$ определяется формулой

$$P(C_i) = p_i \cdot P_i(t), \quad (5.15)$$

где p_i – корректирующий коэффициент, определяемый экспертным путём в зависимости от результатов проведения КТАН; $P_i(t)$ – расчётная величина ВБР для каждого i -го вида отказа в формуле (2.20).

Для вычисления ВБР с учётом рисков возникновения отказов по результатам проведения КТАН (5.15) вместо (2.20) следует применять формулу

$$P(C) = \prod_{i=1}^n P(C_i). \quad (5.16)$$

Для получения корректирующих коэффициентов p_i могут быть использованы методы балльных оценок критичности отказов [224], оценки коэффициентов риска [225] или экспертных оценок в зависимости от состояния отработки и опыта эксплуатации изделий [226].

Рассмотрим случай, когда для определения корректирующих коэффициентов p_i за основу взят метод балльных оценок критичности отказов по ГОСТ 27.310 [224], устанавливающий взаимосвязь между видами отказов по вероятности их возникновения и значениям ожидаемой вероятности (табл. 5.1).

Таблица 5.1

Оценка вероятностей отказов согласно ГОСТ 27.310–95

Виды отказов по вероятности возникновения за время эксплуатации	Ожидаемая вероятность отказов, оцененная расчётом или экспериментальным путём, Q
Отказ практически невероятен	Менее 0,00005
Отказ маловероятен	От 0,00005 до 0,001
Отказ имеет малую вероятность, обусловленную только точностью расчёта	От 0,001 до 0,005
Умеренная вероятность отказа	От 0,001 до 0,005
Отказы возможны, но при испытаниях или в эксплуатации аналогичных изделий не наблюдались	От 0,001 до 0,005

Виды отказов по вероятности возникновения за время эксплуатации	Ожидаемая вероятность отказов, оцененная расчётом или экспериментальным путём, Q
Отказы возможны, наблюдались при испытаниях и в эксплуатации аналогичных изделий	От 0,001 до 0,005
Отказы вполне вероятны	От 0,005 до 0,01
Высокая вероятность отказов	От 0,01 до 0,10
Вероятны повторные отказы	Более 0,11

Корректирующие коэффициенты p_i , можно получить, используя метод балльных оценок критичности отказов:

$$p_i = 1 - Q_i,$$

где Q_i – ожидаемая вероятность отказа i -го элемента согласно шкале балльных оценок критичности отказов (табл. 5.1).

На основании результатов проведения КТАН делают экспертную оценку степени выполнения условий, необходимых для проявления требуемых свойств и полноты отражения соответствующих требований в КД. На основании экспертных оценок устанавливаются виды отказов исходя из вероятности их возможного возникновения при эксплуатации для каждого из свойств КЭ. Критерием экспертного решения по выбору того или иного вида отказов КЭ является степень уверенности в том, что принятые конструкторские решения позволяют достичь заданного уровня работоспособности изделия.

При проведении АН следует иметь в виду, что если приняты все необходимые и достаточные конструкторские и технологические решения, позволяющие на уровне физической необходимости достигнуть заданного результата, то ожидаемая вероятность отказов принимается близкой к нулю (вероятность отказа ничтожна мала).

Взаимосвязь видов отказов, значений ожидаемой вероятности отказов и корректирующих коэффициентов приведена в табл. 5.2.

По каждому выявленному в результате проведения КТАН свойству определяются:

- вероятности нахождения параметров (показателей) в заданных пределах в виде показателя ВБР P_i , например в результате расчётов на прочность или по результатам статистической наработки КЭ, в частности, на безотказность срабатывания пиропатронов;
- условия, необходимые для проявления требуемых свойств в виде доказательства того, что определены все параметры (показатели) и их до-

пуски, приведены обоснования их выбора и установлены требования в КД, обеспечивающие нахождение параметров (показателей) в заданных допусках.

Если условия, необходимые для проявления i -х свойств, определены в полном объёме, то в формуле (2.20) их соответствующие значения принимаются равными расчётно-экспериментальным значениям. Если условия, необходимые для проявления i -х свойств, определены не в полном объёме, то в формуле (2.20) их соответствующие значения принимаются равными расчётно-экспериментальным значениям, а окончательная оценка надёжности производится по формуле (5.16) с учётом (5.15). Если вычисления значений показателей ВБР P_i по какой-либо причине не проведены, то их значение в формуле (5.15) принимается условно равным $P_i \approx 1$, а риски отказов из-за необоснованности параметров (показателей) учитываются при выборе корректирующих коэффициентов p_i согласно табл. 5.2.

Таблица 5.2

Значения корректирующих коэффициентов p_i

Виды отказов по вероятности возникновения за время эксплуатации	Ожидаемая вероятность отказов, оцененная расчётом или экспериментальным путём	Корректирующий коэффициент p_i
Вероятность отказа ничтожна мала	≈ 0	≈ 1
Отказ практически невероятен	Менее 0,00005	Более 0,99995
Отказ маловероятен	От 0,00005 до 0,001	От 0,999 до 0,99995
Отказ имеет малую вероятность, обусловленную только точностью расчёта	От 0,001 до 0,005	От 0,995 до 0,999
Умеренная вероятность отказа	От 0,001 до 0,005	От 0,995 до 0,999
Отказы возможны, но при испытаниях или в эксплуатации аналогичных изделий не наблюдались	От 0,001 до 0,005	От 0,995 до 0,999
Отказы возможны, наблюдались при испытаниях и в эксплуатации аналогичных изделий	От 0,001 до 0,005	От 0,995 до 0,999
Отказы вполне вероятны	От 0,005 до 0,01	От 0,99 до 0,995
Высокая вероятность отказов	От 0,01 до 0,10	От 0,9 до 0,99
Вероятны повторные отказы	Более 0,11	Менее 0,89

Таким образом, если в результате проведения АН расчётное значение показателя безотказности, определённое по (2.20) или (5.16), окажется ниже требуемого значения, то необходимо пересмотреть конструкторско-технологические требования надёжности с корректировкой границ диапа-

зонов значений показателей или параметров, поменять структурную модель надёжности, изменить принятые конструктивные и технологические решения, выполнить недостающие расчёты и т. п. После этого повторно проводят анализ надёжности с оценкой расчётного значения ВБР вплоть до выполнения заданного условия надёжности (3.8).

При проведении АН на основе КТАН нужно придерживаться того правила, что оценку надёжности необходимо воспринимать как некий суммарный итог предпринятых разработчиком шагов для обеспечения безотказности изделия с малой вероятностью отказов.

5.4. Отличия конструкторско-технологического анализа надёжности от анализа видов, последствий и критичности отказов

Обусловленность отказов строгими количественными критериями (3.23) или (3.24) отличает метод конструкторско-технологического анализа надёжности от широко используемых методов анализа надёжности FMEA и FMESA, или их отечественных аналогов АВПО и АВПКО, где последствия невыполнения функций изучают без количественных оценок, что порождает необходимость качественно различать многообразие видов, последствий и критичности отказов. КТАН предназначен для исследования отказов, которые на основе заданных количественных критериев можно свести к бинарному методу оценки событий: отказ возможен – «1», либо невозможен – «0», т. е. к более чёткой квалификации отказов. Это *первое отличие КТАН от методов анализа видов, последствий и критичности отказов.*

Методы АВПО (FMEA) и АВПКО (FMESA) являются общепринятыми формализованными процедурами качественного анализа отказов на некотором уровне разукрупнения структуры изделия, заключающимися в прослеживании причинно-следственных связей, обуславливающих их возникновение и возможные последствия этих отказов на данном и вышестоящих уровнях разукрупнения, в качественной оценке и ранжирования отказов по тяжести их последствий, а также в оценке показателей критичности анализируемых отказов [224; 227–228].

К разновидностям метода FMEA относятся:

1) анализ видов и последствий потенциальных несоответствий конструкции (DFMEA) – метод, цель которого – улучшение конструкции на основе анализа потенциальных несоответствий конструкции с количественным анализом последствий и причин несоответствий;

2) анализ видов и последствий потенциальных несоответствий процесса (PFMEA) – метод, цель которого – улучшение процесса на основе анализа потенциальных несоответствий процесса с количественным анализом последствий и причин несоответствий.

Метод DFMEA используют для исследования функции изделия как потребности и ожидания потребителя, которые установлены, предполагаются или являются обязательными. Отказы определяются через назначение конструкции как невыполнение или частичное выполнение функции таким образом:

- нет функции, например лампочка перегорела;
- ухудшенная функция, например лампочка даёт слабое освещение;
- прерывающаяся функция, например лампочка мигает;
- непредусмотренная функция, например лампочка взрывается.

Метод DFMEA предназначен для выполнения определённых процедур:

- установления потенциальных отказов продукции и оценки их последствий;
- определения возможных причин отказов продукции;
- разработки мер по устранению или управлению причинами потенциальных отказов;
- определения возможных конструктивных причин отказов изделия;
- разработки мер по устранению или управлению конструктивными причинами потенциальных отказов.

Метод PFMEA используют для исследования функций процесса как изготовления продукции в полном соответствии с КД, обеспечивающего безопасную работу персонала, реализующего удобство монтажа и сборки, возможности быстрой переналадки и т. д. Отказы определяются через назначение процесса как невыполнение или частичное выполнение функции путём создания количественно измеримой или количественно неизмеряемой характеристики изделия.

Отказ по функции, создающей количественно измеримую характеристику, формулируется так:

- завышено значение характеристики, например завышена толщина;
- занижено значение характеристики, например занижена толщина;
- неоднородность значений характеристики в единице продукции, например разнотолщинность;
- большой разброс значений характеристики между изделиями, например большой разброс по толщине между изделиями.

Отказ по функции, создающей количественно не измеримую характеристику, например отсутствие дефектов поверхности, формулируется как отсутствие характеристики или появление недопустимой характеристики, например в виде царапин, трещин, заусенец и т. п.

Метод PFMEA предназначен для выполнения определённых процедур:

- установления потенциальных отказов процессов и оценки их последствий;
- определения возможных технологических причин отказов процессов;
- разработки мер по устранению или управлению причинами потенциальных отказов.

Таким образом, методы, основанные на FMEA, предназначены для исследования *функций изделий и процессов*, а метод конструкторско-технологического анализа надёжности – для исследования *человеческих ошибок* при разработке и создании изделий. Это второе отличие КТАН от методов анализа видов, последствий и критичности отказов.

По совокупности указанных отличий, КТАН обладает преимуществом для анализа изделий с малой вероятностью отказов, чувствительных к совершению конструкторских и технологических ошибок, где методы анализа видов, последствий и критичности отказов малоэффективны, поскольку:

- обладают избыточными возможностями, отвлекающими от решения главной задачи – не допустить отказы вне зависимости от их вида, последствий и критичности;
- выявляют неблагоприятные отказы по степени тяжести их последствий, но не дают ответа, как предотвратить саму возможность возникновения отказов;
- прослеживают причинно-следственные связи, обуславливающие возникновение отказов, на уровне функциональных блоков, устроенных по принципу информационных моделей типа «чёрный ящик», что малоэффективно для структур, которые состоят из элементов в виде точек единичных отказов;
- предусматривают анализ отказов при функционировании уже готового изделия без учёта предыстории его появления, хотя, как показывает практика, отказы изделий с малой вероятностью отказов в подавляющем большинстве случаев обусловлены конструкторскими и технологическими ошибками, а не только конструктивными дефектами или неэффективностью технологических процессов.

Необходимость проведения АВПО (FMEA) и/или АВПКО (FMESA) для анализа надёжности изделий с малой вероятностью отказов диктуется только формальным выполнением требований заказчиков, например для обоснования решений о завершённости этапов видов работ на стадиях ЖЦ объектов или при сертификации объектов для проверки достаточности принятых при их разработке и изготовлении мер по обеспечению безопасности и т. д. Если требуется выявить и исключить отказы изделия без ранжирования их по степени тяжести последствий, то следует использовать КТАН.

5.5. Процедуры конструирования изделий с малой вероятностью отказов

В привязке к стадиям ЖЦ, показанным на рис. 4.7, КТОН включает пять процедур:

1) процедура T_1 (участок t_1-t_3) служит для обоснования нахождения в установленных пределах значений параметров и показателей, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях эксплуатации;

2) процедура T_2 (участок t_2-t_3) необходима для установления требований в КД, выполнение которых при изготовлении обеспечивает безусловное нахождение значений показателей и параметров в заданных допусках. В результате выполнения процедуры T_2 каждому параметру (показателю) в КД должны соответствовать установленные требования в графической или текстовой форме, что в конечном счёте обеспечит безусловное выполнение изделием функциональных задач;

3) процедура T_3 (участок t_3-t_5) обеспечивает гарантированное выполнение требований КД на этапах технологической подготовки и производства изделий. Задача данной процедуры – исключение технологами и производителями каких-либо искажений и интерпретаций требований надёжности, установленных в КД, а также подтверждение того, что конструкторские, технологические и метрологические методы изготовления, сборки, монтажа и контроля выстроены на единых принципах;

4) процедура T_4 (участок t_4-t_5) служит для обеспечения контроля за выполнением требований КД техническими службами контроля на производстве. Объёмы и средства контроля должны обеспечить эффективность выполнения условий (3.23)–(3.24);

5) процедура T_5 (участок t_1-t_5) предназначена для верификации требований надёжности путём проведения КТАН. В случае обнаружения невыполнения любой из процедур T_1-T_4 , необходимо принять меры по устранению обнаруженных проблем.

Все пять процедур рассматриваются как единая и неделимая совокупность процессов, обеспечивающих выполнение заданных требований к надёжности.

Конструирование рассматривается как совокупность (единство) двух равнозначимых процессов при осуществлении процедур T_1 и T_2 : визуализация образа будущего изделия в виде чертежей (2D-проекции) или 3D-моделей и параметрическое моделирование (оцифровка) конструкции (рис. 5.1). Причём параметризация (оцифровка) конструкции является виртуальным процессом создания областей её состояний E (2.63) и работоспособности G (2.76), т. е. процессом перевода графического изображения из-

деля в параметрическую модель. Оцифровка позволяет за счёт варьирования значений параметров или геометрических соотношений просчитать различные конструктивные схемы и избежать принципиальных ошибок при конструировании.

Оцифровка конструкции заключается в составлении вектор-столбцов параметров (показателей) X (5.3) и допусков ΔX (3.20), которые количественно характеризуют свойства будущих изделий, обеспечивающих их работоспособность. При этом процедура обоснования параметров (показателей) T_1 сводится к подтверждению того, что все действительные значения параметров и показателей X_i (5.3), составляющие область возможных состояний E (2.63), находятся в соответствующих допусках ΔX_i (3.21), которые определяют область работоспособности G (2.76).

Таким образом, параметрическое моделирование при конструировании играет ключевую роль, с одной стороны, оно позволяет оптимизировать конструктивные схемы и избегать принципиальных конструкторских ошибок, а с другой – сам по себе вектор-столбец параметров (показателей) (5.3) служит основой составления контрольного списка (чек-листа) [213] для критериального обоснования необходимости и достаточности установленных требований в КД (выполнение процедуры T_2). В этом случае все расчёты по обоснованию параметров (выполнение процедуры T_1), которые сопровождают процесс проектирования и конструирования, производятся для подтверждения установленных в КД требований, причём общее количество таких расчётов определяется номенклатурой указанных требований, и наоборот.

Цель конструирования – это выпуск комплекта рабочей конструкторской документации, в строгом соответствии с которой должны быть выполнены все последующие процедуры: изготовление, контроль, приёмка, поставка, эксплуатация и ремонт изделия. При производстве любого изделия необходимо обеспечить безусловное выполнение требований, заложенных в КД, которые для изготовителя являются фактически приказами к исполнению. Установление требований – это прямая задача конструктора, для решения которой он обязан предусмотреть и произвести необходимые расчёты и испытания.

Важно понимать, что процедуры конструирования T_1 и T_2 направлены на достижение работоспособности объекта, а процедуры анализа – на осознание, почему что-то может отказать, что при этом может произойти и какие действия необходимо предпринять, чтобы объект всё же сохранил свою работоспособность. Конструирование, как правило, осуществляется эвристическими методами, а процесс анализа и обеспечения надёжности – методами, построенными исключительно на утилитарных научных (системных) подходах.

Психологический фактор при выполнении процедур анализа и обеспечения надёжности является определяющим. Одно дело – целенаправленно думать, каким образом объект будет работать, и совсем другое дело – выискивать причины, по каким причинам он непременно должен отказать. Конструктор склонен защищать своё детище, «закрывать глаза» на упущения и недостатки, смотреть на конструкцию «замыленным» взглядом, что по-человечески совершенно естественно и нормально. Поэтому напрашиваются аналогии из юридической практики адвокатов и прокуроров, когда один защищает, а другой обвиняет, но вместе они вершат правосудие. На необходимость и уместность разделения функций по обеспечению надёжности при конструировании не раз обращалось внимание. Например, *Mary L. Bowden* указывала, что анализы на отказоспособность *«должен делать беспристрастный, критически настроенный проверяющий, а не проектант..., который... будет думать о том, каким образом система будет работать, но не о том, каким образом она откажется работать»* [26]. При этом такой «критически настроенный проверяющий» должен иметь, как образно выразился И.А. Рябинин, *«психологию “диверсанта”, т. е. грамотно думать, как ... привести систему в опасное состояние»* [229].

ГЛАВА 6

ПРАКТИКА ПРИМЕНЕНИЯ КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО АНАЛИЗА НАДЁЖНОСТИ

6.1. Обзор примеров применения анализов надёжности с учётом конструкторских и технологических факторов

Изложенные в главе 5 алгоритмы и методы проведения КТАН прошли апробацию при анализах отказоспособности МУ ОС различного назначения, включая замок зачековки панелей солнечных батарей, выдвигную стержневую штангу крупногабаритного рефлектора (далее – штангу рефлектора), поворотные механизмы БС, *устройство спусковое* (УС) замков зачековки, подвижные узлы открытия и закрытия доступа в затрубное пространство нефтяных скважин [17–21]. Результаты этих анализов обобщены в работах [186; 216]. Ниже приведены наиболее характерные и интересные, по мнению автора, примеры выполнения КТАН:

- полный конструкторский анализ надёжности механизма срабатывания УС [21];
- фрагмент анализа исполнительного механизма открытия доступа в затрубное пространство нефтяных скважин для демонстрации возможностей совместного решения конструкторско-технологических задач надёжности [18];
- версия проведения конструкторского анализа надёжности конструкции штанги рефлектора в рабочем положении в течение срока активного существования [20].

К моменту проведения анализов разработчики выпустили полные комплекты рабочей конструкторской документации. Соответственно были проведены все необходимые расчётно-экспериментальные подтверждения работоспособности конструкций согласно принятым на предприятиях нормам и стандартам. Для анализов использовалась вся имеющаяся у разработчика документация, регламентирующая условия разработки и изготовления изделий: ТЗ, ТУ, инструкции по эксплуатации, чертежи на изготовление деталей и сборку изделий, спецификации, программы и методики испытаний, расчёты и т. д. Если технологическая документация не была разработана, то выполнялась только конструкторская часть анализов на-

дёжности, на основании чего делались выводы с учётом (5.2). При наличии технологической документации КТАН проводился в полном объёме. В этом случае у разработчика запрашивался полный комплект ТД, как правило, – это маршрутные карты, технологические паспорта, типовые инструкции и т. п. документы. Когда в документации содержались ссылки на НТД, при проведении анализов принимались во внимание соответствующие требования нормативных документов, включая стандарты предприятий.

В приведённых примерах анализов за рамками изложения остаются методики и конкретные результаты расчётов, произведённые разработчиком к моменту начала проведения конструкторско-технологического анализа надёжности. Если такие расчёты соответствуют критериям проведения КТАН, то их принимают к сведению и выводы анализов строят на их основе. В тех же случаях, когда разработчик не предоставил необходимых с позиций конструкторско-технологического анализа надёжности расчётов, то по его результатам разработчику предлагалось выполнить необходимые расчёты либо они производились в ходе выполнения анализа.

Главная цель размещения здесь материалов анализов заключается в том, чтобы наглядно представить порядок и общие принципы проведения КТАН на практике, а также возможное содержание выводов и рекомендаций на его основе. Исходя из этого в приведённых примерах применена определённая схематизация реальных анализов, связанная с упрощением или исключением из рассмотрения тех расчётов, которые не влияют на суть изложения.

6.2. Пример конструкторского анализа надёжности устройства спускового

Анализ надёжности устройства спускового может быть использован как образец для проведения конструкторского анализа надёжности механических устройств одноразового срабатывания методом КТАН. Принципы и подходы, используемые в данном примере, являются общими для всех механических устройств, срабатывание которых необходимо для изменения конфигурации КА (перевода из сложенного положения в рабочее).

6.2.1. Описание конструкции устройства спускового

Устройство спусковое (УС) представляет собой быстроразъемное устройство безударного действия, используемое в системах зачековки РК, которое структурно состоит из двух частей:

- 1) актуатора, преобразующего командный электрический сигнал в линейное перемещение штоков;
- 2) держателя, обеспечивающего механическую связь удерживаемого объекта с опорным основанием и их разделение после срабатывания актуатора.

Конструктивная схема УС приведена на рис. 6.1.

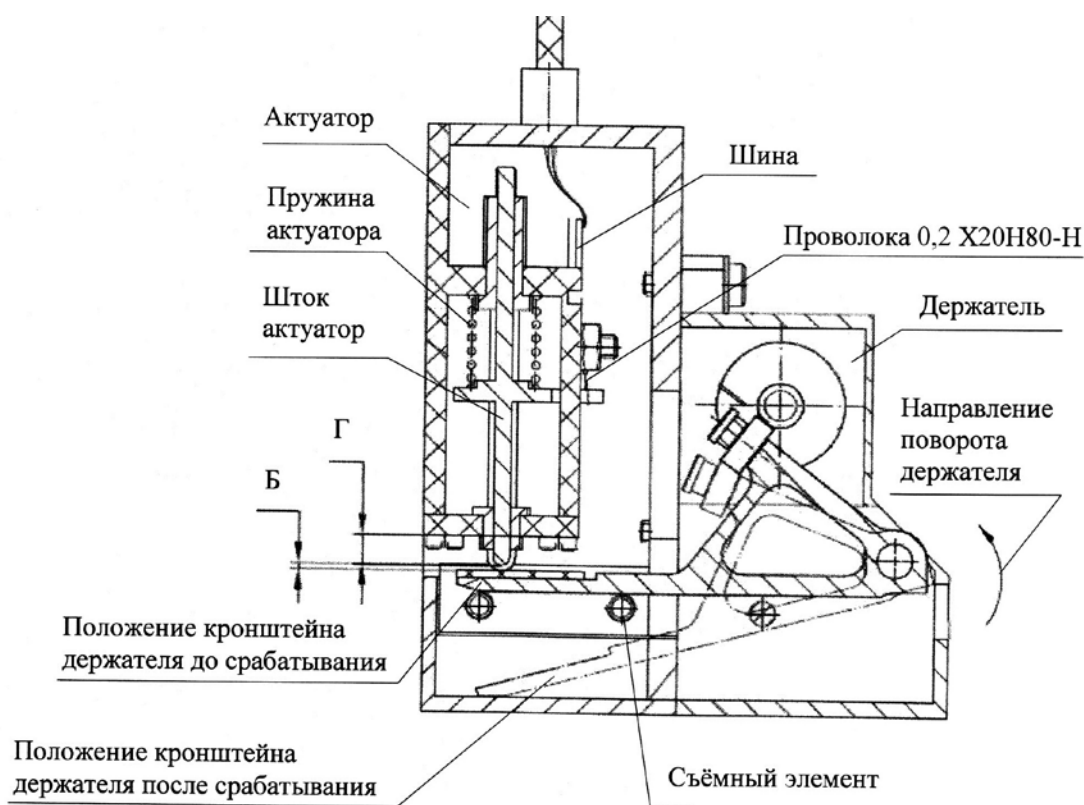


Рис. 6.1. Конструктивная схема УС

В исходном положении УС (до срабатывания) штоки актуатора удерживаются в неподвижном состоянии проволоками 0,2 Х20Н80-Н ГОСТ 12766.1 [230]. Каждая из проволок прикреплена к шинам электрической цепи контактным гаечно-винтовым зажимом с дополнительной приваркой концов проволоки к шинам и охватывает боковой выступ соответствующего штока, тем самым уравновешивая силу пружины актуатора.

Между штоком актуатора и кронштейном держателя в исходном положении настраивается зазор $B = 0,2^{+0,1}$ мм. Вылет штока актуатора из корпуса регулируется в размер $\Gamma = 2 \pm 0,2$ мм. Поворот кронштейна держателя в направлении срабатывания ограничен съёмным элементом, предохраняющим УС от случайного срабатывания, который перед началом штатной эксплуатации должен быть демонтирован.

Внешний вид актуатора в исходном положении показан на рис. 6.2.

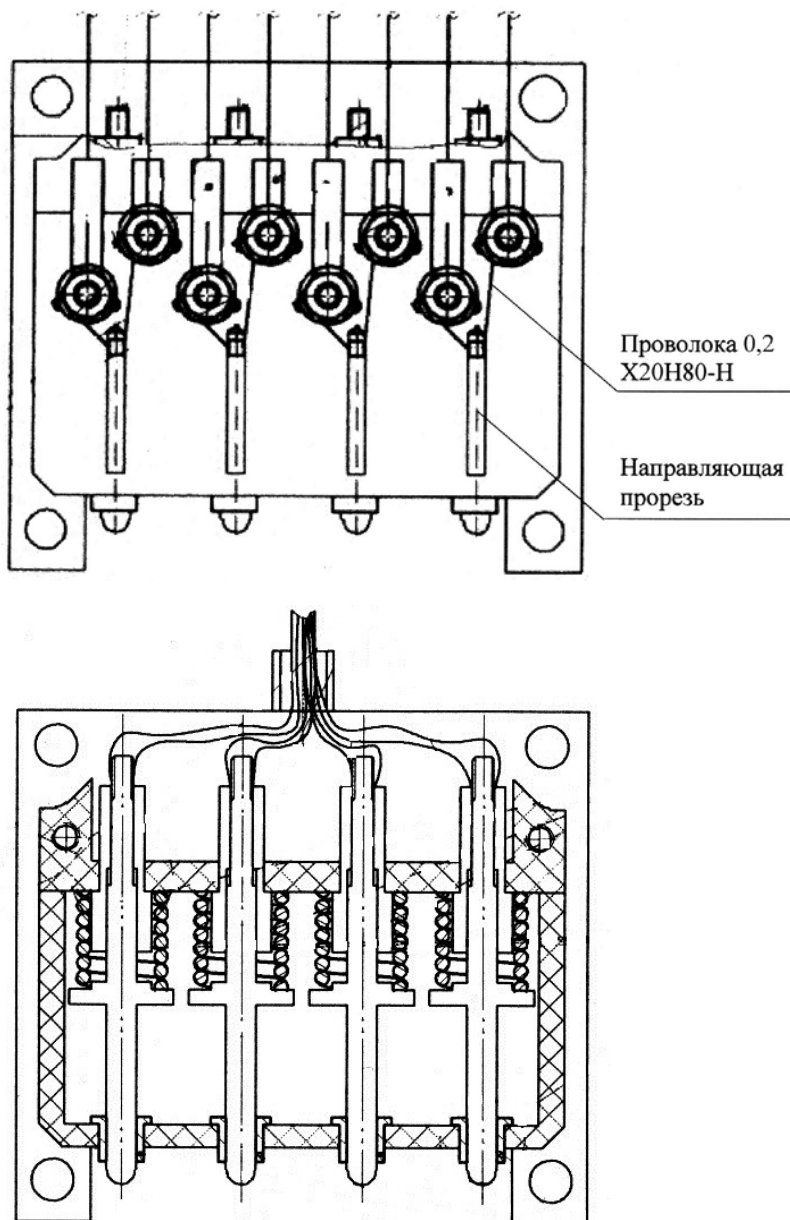


Рис. 6.2. Актуатор в исходном положении

При подаче на шины электрического сигнала из бортового комплекса управления проволока перегорает, освобождая штоки, в результате чего под действием пружины актуатора происходит его перемещение во втулках и в направляющей прорези корпуса (рис. 6.2). Перемещаясь, шток актуатора надавливает на кронштейн держателя и принуждает его повернуться, тем самым обеспечивая срабатывание держателя. Для резервирования пережигаемых проволок в актуаторе используется четыре штока, каждый из которых выполняет требуемую работу автономно, причём срабатывание одного штока должно обеспечить заданную безотказность актуатора и спускового устройства в целом. Актуатор является устройством одно-

кратного действия, поэтому после каждого срабатывания УС с разрушением пережигаемых проволок производится его полная замена.

Схема удержания держателя в исходном положении показана на рис. 6.3.

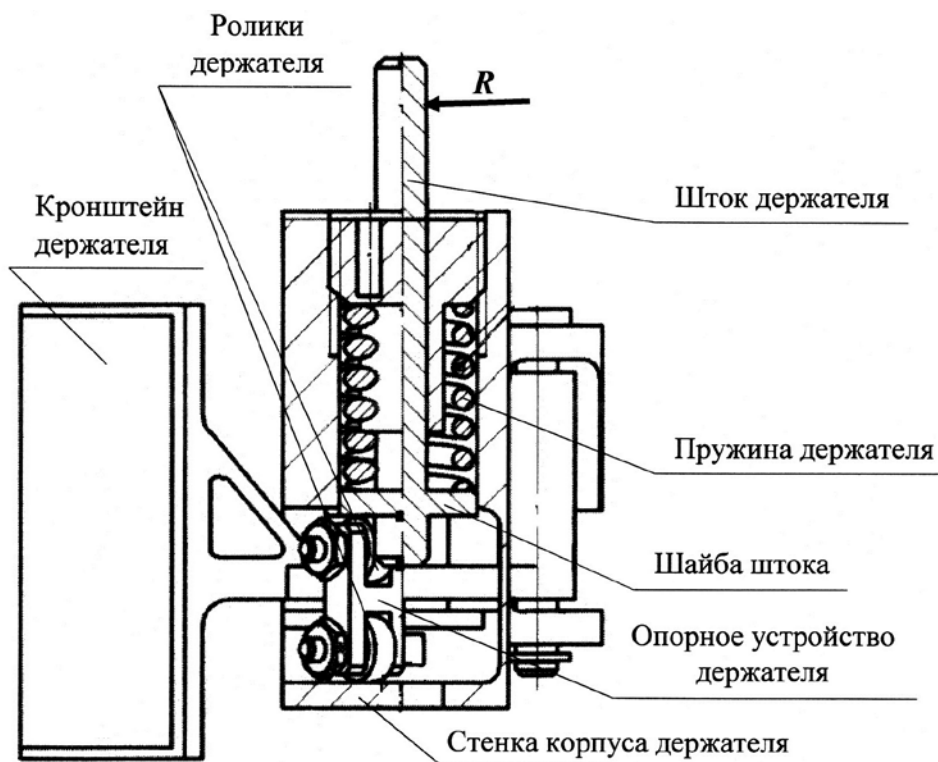


Рис. 6.3. Схема удержания держателя в исходном положении

При эксплуатации до срабатывания кронштейн держателя сохраняет своё исходное положение за счёт фрикционно-силового удержания опорного устройства между стенкой корпуса и шайбой подпружиненного штока. Фрикционное удержание осуществляется за счёт сил трения между одним из двух роликов опорного устройства и стенкой корпуса держателя, с одной стороны, и между вторым роликом опорного устройства и шайбой штока держателя – с другой стороны. При срабатывании УС штоки актуатора, надавливая на кронштейн держателя, создают момент силы относительно оси вращения кронштейна. Под действием вращательного момента в направлении поворота держателя (см. рис. 6.1) ролики опорного устройства кронштейна преодолевают силу пружины держателя и выкатываются за пределы шайбы штока держателя, после чего шток перемещается под действием пружины держателя, освобождая удерживаемый объект.

Расчётная схема удержания и освобождения роликов держателя приведена на рис. 6.4.

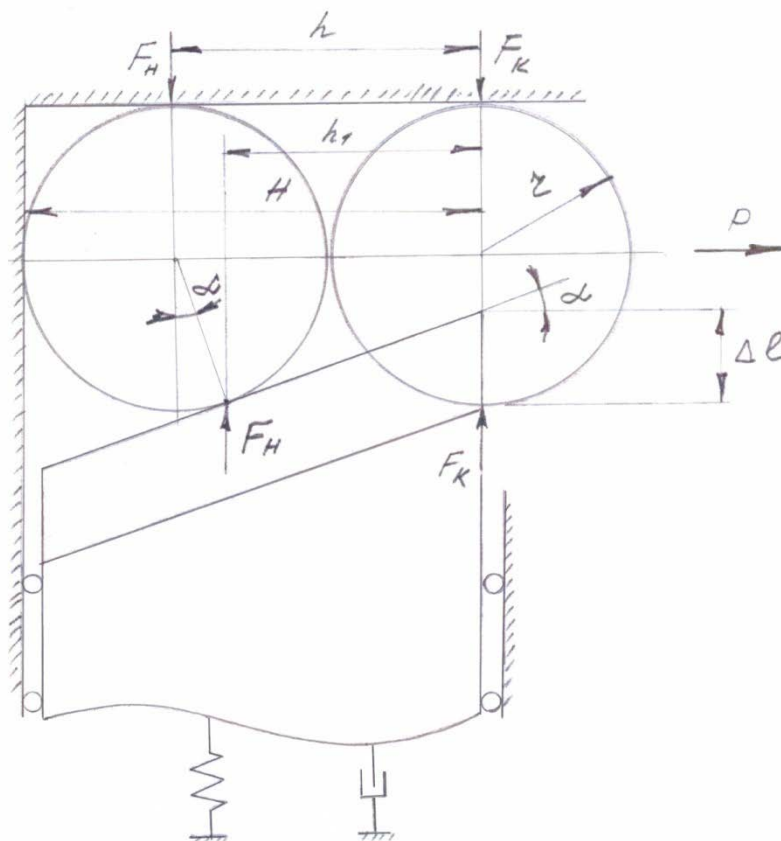


Рис. 6.4. Расчётная схема силового удержания и освобождения роликов держателя: F_H , F_K – сила поджатия ролика в исходном положении и в конце перемещения ролика при срабатывании; r – радиус ролика; α – угол подъёма ролика по шайбе штока; H – половина разности диаметра шайбы и диаметра упорной поверхности ролика; h – разница между исходным и конечным положениями ролика в направлении P ; h_1 – максимальная высота подъёма ролика при качении по шайбе; Δl – сжатие пружины держателя

Силовое удержание роликов в направлении силы P , которая редуцируется в результате действия момента силы относительно оси вращения кронштейна, осуществляется за счёт наклона линии контакта ролика и шайбы штока на угол α . Ролик удерживается в исходном положении силой пружины держателя, имея возможность перемещаться под действием силы P , обеспечивая при этом смещение штока держателя в ортогональном направлении. Для срабатывания держателя необходимо преодолеть тангенциальную составляющую от силы пружины держателя и силу сопротивления, которая возникает от действия поперечной силы на конце штока $R = (100 + 10)$ Н со стороны удерживаемого объекта, а также силы сопротивления, возникающие при сдвиге роликов под действием нормальной составляющей силы пружины держателя.

Согласно техническому заданию на разработку вероятность безотказной работы УС должна быть не ниже 0,999 995, что с учётом распределения требований к надёжности актуатора и держателя исходя из принципа равнопрочности соответствует значениям ВБР не менее 0,999 997 5 для каждого.

6.2.2. Функциональный анализ актуатора

В процессе эксплуатации актуатор выполняет две функциональные задачи:

1) препятствует несанкционированному срабатыванию УС в исходном положении;

2) по команде из БКУ обеспечивает требуемое линейное перемещение штока с заданным усилием надавливания на кронштейн держателя.

Решение первой функциональной задачи обеспечивается за счёт соблюдения условий прочности проволоки 0,2 Х20Н80-Н при её нагружении усилием от пружины актуатора и несрабатывания УС при возникновении наведённых напряжений в отключенных электрических цепях при эксплуатации в условиях факторов космического пространства.

Вторая функциональная задача решается за счёт перегорания проволоки по команде из БКУ в результате подачи тока определённой силы в течение заданного времени, а также за счёт выбора соответствующих механических характеристик пружины актуатора и трибологических характеристик сопряжения штока актуатора.

В процессе эксплуатации актуатор (а) выполняет три функции: предохранение от несанкционированного срабатывания в исходном положении (1а); освобождение штока по команде из БКУ для осуществления требуемого линейного перемещения (2а); обеспечение требуемого линейного перемещения штока с заданным усилием в конце хода (3а), которые выполняются последовательно.

В процессе функционирования потери любой из функций не допускаются. Соответственно под отказами понимают такие события:

- по функции 1а – несанкционированное срабатывание актуатора в исходном положении;
- 2а – неперегорание проволоки после подачи электрического сигнала из БКУ;
- 3а – необеспечение требуемого линейного перемещения штока с заданным усилием в конце хода.

Актуатор имеет конструктивную особенность, которая приводит к тому, что отказы при функционировании в исходном положении и при срабатывании на орбите вносят разную весовую долю в общую безотказность.

Безотказность актуатора складывается из двух составляющих:

1) вероятности несанкционированного несрабатывания в исходном положении;

2) вероятности срабатывания по служебному назначению, т. е. срабатывания, обеспечивающего раскрытие закрепляемой конструкции в рабочее положение.

Структурная схема надёжности актуатора приведена на рис. 6.5.

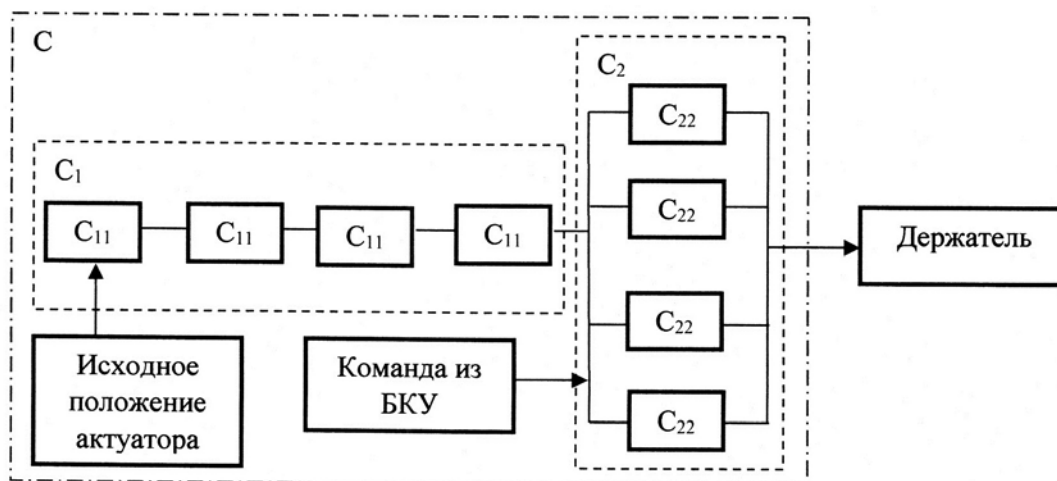


Рис. 6.5. Структурная схема надёжности актуатора

На основании представленной структурной схемы надёжности вероятность безотказной работы актуатора равна:

$$P_a = P(C) = P(C_1) \cdot P(C_2), \quad (6.1)$$

здесь
$$P(C_1) = P^4(C_{11}), \quad (6.2)$$

$$P(C_2) = 1 - [1 - P(C_{22})]^4, \quad (6.3)$$

где $P(\cdot)$ – вероятность события, обозначенного в круглых скобках; C – безотказное функционирование актуатора по служебному назначению; C_1 – несанкционированное несрабатывание актуатора в исходном положении; C_2 – срабатывание актуатора по служебному назначению; C_{11} – несанкционированное несрабатывание одного штока; C_{22} – срабатывание одного штока по служебному назначению.

Поскольку, исходя из бюджета надёжности, ВБР актуатора должна быть не менее $P_a = 0,999\ 997\ 5$, то (используя принцип равнопрочности) вероятности несанкционированного несрабатывания $P(C_1)$ и срабатывания по служебному назначению актуатора $P(C_2)$ с учётом (6.1) определяются по формуле

$$P(C_1) = P(C_2) = \sqrt{0,9999975} = 0,999\ 998\ 75.$$

Из структурной схемы расчёта надёжности следует, что отказ актуатора может произойти при несанкционированном срабатывании любого из четырёх штоков, поскольку штоки в исходном положении соединены последовательно. В то же время срабатывание актуатора может произойти от одного из четырёх штоков вследствие их параллельного соединения. Таким образом, с учётом (6.2)–(6.3) допустимые ВБР для каждого из штоков в исходном положении и при срабатывании равны:

$$P(C_{11}) = \sqrt[4]{P(C_1)} = 0,999\ 999\ 687. \quad (6.4)$$

$$P(C_{22}) = 1 - \sqrt[4]{1 - P(C_2)} = 0,966\ 563. \quad (6.5)$$

Исходя из (6.4)–(6.5) следует, что для обеспечения заданной надёжности актуатору в исходном положении необходимо иметь избыточную работоспособность проволоки 0,2 X20H80-Н не только по электрическим параметрам срабатывания (6.5), но и по конструкционной прочности (6.4). Причём при расчётном обеспечении конструкционной прочности необходимо использовать коэффициент безопасности f_6 , который бы соответствовал требуемой безотказности (6.4) с учётом рекомендаций по соотношению между коэффициентами безопасности и ВБР [110] и назначения дополнительного коэффициента безопасности f_6^* на конструктивные элементы повышенной ответственности (2.74).

6.2.3. Функциональный анализ держателя

В процессе эксплуатации держатель выполняет две функциональные задачи:

- 1) препятствует перемещению штока держателя до момента срабатывания актуатора;
- 2) обеспечивает перемещение штока держателя в направлении рабочего хода после придания подвижности хотя бы одного из штоков актуатора.

Решение первой функциональной задачи обеспечивается при фрикционно-силовом удержании в номинально неподвижном состоянии роликов опорного устройства держателя, зажатых между шайбой штока и стенкой корпуса держателя за счёт усилия пружины держателя.

Вторая функциональная задача решается за счёт обеспечения поворота кронштейна держателя относительно оси вращения при надавливании на его опорную площадку хотя бы одного из четырёх штоков актуатора.

В процессе функционирования держатель (д) выполняет следующие функции: сохранение исходного положения держателя до момента сраба-

тывания актуатора (1д); освобождение штока держателя после срабатывания актуатора (2д); осуществление заданного перемещения штока держателя (3д), которые выполняются последовательно.

В процессе функционирования потери любой из функций не допускаются. Соответственно под отказами понимают такие события:

- по функции 1д – преждевременное несанкционированное срабатывание держателя;
- 2д – неосвобождение штока держателя после срабатывания актуатора;
- 3д – неперемещение штока держателя на заданную величину.

6.2.4. Обобщенный функциональный анализ устройства спускового

Структурно УС представляет собой два автономных устройства, объединённых в функциональную группу для выполнения единой задачи – срабатывания и освобождения механических устройств высшего порядка иерархии – удерживаемого объекта (на рис. 6.3 удерживаемый объект не показан, его действие заменено силой R). Таким образом, функции УС можно представить так:

- функция 1 – предохранение УС от преждевременного срабатывания (последовательное выполнение функций 1а и 1д);
- функция 2 – срабатывание УС (последовательное выполнение функций 2а, 3а и 2д);
- функция 3 – освобождение удерживаемого объекта.

Соответственно под отказами УС понимаются следующие события:

- по функции 1 – преждевременное срабатывание УС из-за отказов по функциям 1а и 1д;
- по функции 2 – несрабатывание УС из-за отказов по функциям 2 и 3.

6.2.5. Анализ худшего случая устройства спускового

В исходном положении УС должно обеспечивать сохраняемость не менее 8,5 лет с даты изготовления, в том числе не менее 48 ч с момента запуска космического аппарата в условиях факторов космического пространства, и выдерживать квазистатические и вибрационные нагрузки активного участка. Срабатывание УС осуществляется в условиях вакуума при давлении от $1,33 \cdot 10^{-6}$ до $1,33 \cdot 10^{-8}$ Па (от 10^{-8} до 10^{-10} мм рт. ст.) и температурах окружающей среды от минус 100° до плюс 100° С. В процессе функционирования УС должно обеспечивать запас по срабатыванию не менее 200 % (отношение 3:1) для наихудшего случая.

Худшим случаем в исходном положении актуатора является действие на проволоку статической нагрузки от пружины актуатора в течение 8,5 лет, при этом в течение 48 ч действие статической нагрузки может сочетаться с повышенной температурой окружающей среды до плюс 100 °С и тепловыделением проволоки из-за наведённых напряжений при отключенных электрических цепях при эксплуатации в условиях ФКП.

Худшим случаем в исходном положении держателя будет осуществление подвижности кронштейна держателя в номинально неподвижном состоянии под действием вибрации, что в конечном счёте может привести к несанкционированному срабатыванию держателя.

Назовём худшие случаи при срабатывании УС:

- сочетание наименьшего усилия на пружине актуатора и максимального усилия на пружине держателя в момент схода ролика опорного устройства кронштейна с шайбы штока;
- попадание капель расплавленного металла проволоки на шток через прорезь для перемещения выступа штока (см. рис. 6.2);
- несняtie съёмного элемента при подготовке космического аппарата к пуску (см. рис. 6.1).

6.2.6. Конструкторский анализ надёжности устройства спускового

Поскольку технологическая документация на спусковое устройство не разрабатывалась, то анализ надёжности производился в объёме выпущенной конструкторской документации. Результаты анализа свойств критичных элементов, обеспечивающих безотказность УС, приведены в табл. 6.1.

Свойства, обеспечивающие безотказность УС, выявляются на основании проведённого функционального анализа методом парирования причин возникновения отказов. Искомые свойства КЭ определяются таким образом, чтобы реализация каждой из причин отказов оказалась невозможной при соответствующем конструктивном исполнении УС. Для обоснования выбора показателей и параметров для количественной характеристики свойств приведён анализ выполнимости свойств КЭ, обеспечивающих безотказность спускового устройства. В ходе анализа выполнимости свойств осуществлялась экспертиза проведённых при разработке КД расчётов на прочность Р12 и расчётов надёжности Р14 [218] по обоснованию показателей и параметров. В случае отсутствия в расчётах такового обоснования производилась их количественная оценка или оценка рисков их невыполнения.

Результаты анализа выполнимости свойств КЭ приведены в табл. 6.3. Их использовали при оценке необходимости и достаточности требований, установленных в КД для безусловного выполнения требуемых функций УС.

Таблица 6.1

Свойства критичных элементов, обеспечивающие безотказность спускового устройства

Отказы	Условия возникновения отказов	Причины отказов	Свойства, обеспечивающие безотказность	Показатели или параметры, характеризующие свойства, обеспечивающие безотказность
Преждевременное срабатывание УС	Механические нагрузки на проволоку 0,2 X20H80-N при действии пружины актуатора	Разрушение проволоки 0,2 X20H80-N	Свойство проволоки 0,2 X20H80-N обеспечивать конструкционную прочность при нагружении пружиной актуатора	Допустимое усилие разрушения проволоки 0,2 X20H80-N
		Вытягивание концов проволоки 0,2 X20H80-N из-под прижимных шайб гаечно-винтового зажима под действием пружины актуатора	Свойство заделки концов проволоки 0,2 X20H80-N выдерживать нагрузку от действия пружины актуатора	Допустимое усилие вытягивания проволоки 0,2 X20H80-N из-под прижимных шайб гаечно-винтового зажима
	Индуктивные наводки в сочетании с механическими нагрузками на проволоку при пересечении магнитосферы Земли	Разрушение проволоки 0,2 X20H80-N	Свойство проволоки 0,2 X20H80-N обеспечивать конструкционную прочность при возникновении индукционных токов	Вероятность сохранения конструкционной прочности проволоки 0,2 X20H80-N с учётом индуктивных наводок
	Пробой электрических цепей электростатическим разрядом	Перегорание проволоки 0,2 X20H80-N	Свойство конструкции УС обеспечивать приведение всех его частей к одному электрическому потенциалу	Вероятность невозникновения электростатического пробоя
Преждевременное срабатывание УС	Вибрационные перемещения сопрягаемых деталей при вибрациях на участке выведения	Несанкционированный поворот кронштейна держателя вследствие вибрационных перемещений	Свойство конструкции держателя препятствовать возникновению несанкционированного поворота кронштейна держателя	Вероятность запираения ролика опорного устройства кронштейна штоком держателя при вибрациях на участке выведения

Несрабатывание УС	Несрабатывание держателя после срабатывания актуатора	Недостаточный ход пружины актуатора	Свойство пружины актуатора обеспечивать ход, необходимый для срабатывания держателя	Допустимый ход пружины актуатора
	Срабатывание только одного из четырёх штоков актуатора	Недостаточный запас движущего момента для поворота кронштейна держателя	Свойство пружины актуатора обеспечивать заданный запас движущего момента для поворота кронштейна держателя	Допустимый запас движущего момента при действии одной из четырёх пружин актуатора
	Повышенное сопротивление перемещению штока держателя	Недостаточный запас движущего усилия для перемещения штока держателя	Свойство пружины держателя обеспечивать заданный запас движущего усилия для перемещения штока держателя	Допустимый запас движущего усилия для перемещения штока держателя
	Попадание окалины на шток актуатора в результате перегорания проволоки	Заклинивание штока актуатора во втулке	Свойство сопряжения штока актуатора и втулки образовывать сопряжение с зазором больше размера капель расплавленного металла, образующихся в результате перегорания проволоки	Вероятность заклинивания штока актуатора во втулке
	Неснятие съёмных элементов при подготовке КА к пуску	Невнимательность персонала	Свойство съёмных элементов привлекать внимание персонала	Вероятность демонтажа съёмных элементов при работах с УС

Проведём анализ выполнимости свойств критических элементов устройства спускового, которые приведены в табл. 6.1.

Свойство проволоки 0,2 X20H80-Н обеспечивать конструкционную прочность при нагружении пружинной актуатора. Для проволоки из сплава X20H80-Н в стандарте ГОСТ 12766.1 установлены требования по временному сопротивлению разрыву не более 1000 Н/мм^2 (102 кгс/мм^2) и относительному удлинению не менее 20 % (п. 1.3.9 ГОСТ 12766.1). При этом контроль относительного удлинения и временного сопротивления разрыву проволоки должен производиться на предприятии-изготовителе периодически, но не менее одной партии⁴ в год каждой марки сплава (п. 2.7 ГОСТ 12766.1). Исходя из требований ГОСТ 12766.1 следует, что проволока 0,2 X20H80-Н не предназначена для изготовления нагруженных элементов конструкций, тем более с высокой степенью ответственности.

В исходном положении актуатора (до пережигания) каждая из четырёх проволок 0,2 X20H80-Н уравнивает силу P от пружины актуатора согласно расчётной схеме, приведённой на рис. 6.6.

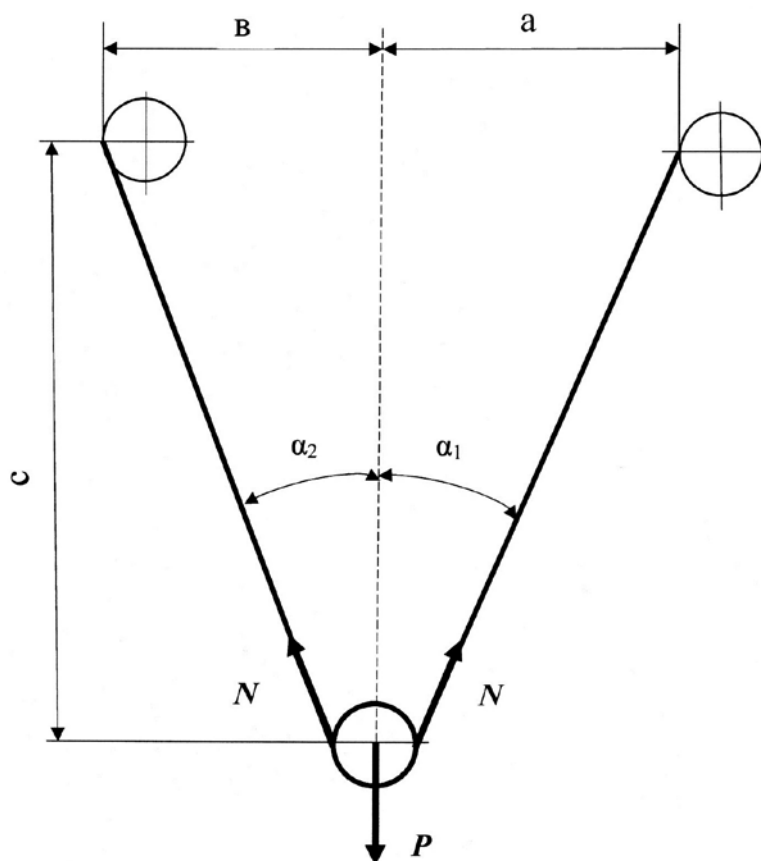


Рис. 6.6. Расчётная схема для определения усилий в проволоке от силы P

⁴ Партия – проволока из одной плавки одного диаметра.

Условие равновесия в проволоке (без учёта трения и боковой реакции выступа штока актуатора в направляющих прорезях корпуса) записывают с помощью уравнения

$$P = N \cdot (\cos \alpha_1 + \cos \alpha_2),$$

где α_1, α_2 – углы наклона нитей проволоки с учётом расположения точек крепления с размерами a, b и c .

Исходя из геометрических размеров актуатора, параметры расчётной схемы рис. 6.6 имеют такие значения: $c = 1,7$ мм; $a = 1,25$ мм; $b = 2,75$ мм; $\alpha_1 = 23,8^\circ$; $\alpha_2 = 52,9^\circ$. Усилие P при номинальном усилии пружины актуатора F_2 , соответствующем рабочей деформации, равно $P = F_2 = 3,6$ кгс, при этом усилии в проволоке составляет $N = 2,37$ кгс.

Полученное расчётное значение N необходимо сравнивать с несущей способностью проволоки 0,2 X20H80-N. При этом нужно учесть, что УС изготавливается со сменными комплектами актуаторов, каждый из которых должен храниться в нагруженном состоянии проволоки в течение 8,5 лет с даты изготовления. При длительном силовом воздействии на проволоку условие прочности должно определяться как минимум с учётом предела текучести для того, чтобы исключить возможность возникновения деформаций пластичности и/или ползучести.

Поскольку требования ГОСТ 12766.1 не содержат нормированных значений пределов текучести материала сплава X20H80-N, а предел прочности по временному сопротивлению разрыву установлен только по верхнему значению (не более 102 кгс/мм²), то оценка прочности проволоки носит условный характер исходя из следующих гипотез:

- временное сопротивление на разрыв $\sigma_{\text{в}} = 102$ кгс/мм² (в действительности, согласно п. 1.3.9 ГОСТ 12766.1, значение временного сопротивления разрыву всегда будет ниже);

- поскольку сплав X20H80-N относится к материалам повышенной пластичности ($\delta > 20\%$), для которых характерен значительный диапазон между пределом текучести и временным сопротивлением [231], и с учётом ограничений значения усилий натяжения проволоки при эксплуатации не более 0,6 от разрывного усилия (раздел 6 ГОСТ 12766.1), то предел текучести принимается равным $\sigma_{0,2} = 0,6\sigma_{\text{в}}$.

Принимая во внимание указанные гипотезы, при номинальном значении площади поперечного сечения проволоки $F_0 = 0,031$ мм² получаем такие результаты:

- условная номинальная несущая способность проволоки по пределу текучести определяется усилием

$$N_{\text{пр}}^{0,2} = \sigma_{0,2} \cdot F_0 = 61,2 \cdot 0,031 = 1,89 \text{ кгс};$$

- условная номинальная несущая способность по временному сопротивлению разрыву определяется усилием

$$N_{\text{пр}}^{\text{в}} = \sigma_{\text{в}} \cdot F_0 = 102 \cdot 0,031 = 3,16 \text{ кгс.}$$

Как следует из расчётов, напряжения, которые возникают в проволоке 0,2 X20H80-H под действием усилия пружины актуатора, близки к пределу прочности по временному сопротивлению (запас прочности на разрыв не более 1,33) и превышают предел текучести (запас прочности по пределу текучести не более 0,79).

Исходя из анализа КД, требования к безотказности актуатора в части обеспечения конструкционной прочности не установлены, поскольку:

- расчёты на прочность Р14 не содержат расчётных случаев, подтверждающих прочность элементов конструкции актуатора;
- в анализах (расчётах) надёжности Р12 нет оценки вероятности несанкционированного срабатывания;
- в требованиях чертежа и ТУ не содержится норм прочности элементов конструкций актуатора;
- в программах и методиках лабораторно-отрабочных и конструкторско-доводочных испытаний не предусмотрены экспериментальные подтверждения прочности элементов конструкций актуатора.

Рассматриваемое свойство количественно выражается значением допустимого усилия разрушения проволоки 0,2 X20H80-H как минимум по пределу текучести.

При применении проволоки 0,2 X20H80-H в качестве силового элемента УС, в конструкторской документации необходимо указать нормы прочности проволоки, включающие требования к назначению коэффициентов безопасности, регламентированию монтажных усилий, определению нагрузок, расчётной проверке прочности, экспериментальной отработке прочности, контролю и подтверждению прочности на этапах экспериментальной отработки, лётных испытаний и штатной эксплуатации.

Свойство заделки концов проволоки 0,2 X20H80-H выдерживать нагрузку от действия пружины актуатора. Допустимое усилие вытягивания проволоки из-под прижимных шайб гаечно-винтового зажима под действием пружины актуатора определяется граничными условиями заделки концов проволоки 0,2 X20H80-H. Заделка концов проволоки производится путём однократного обматывания резьбовых частей контактов по часовой стрелке и соединения концов проволоки с шиной в точке с помощью лазерной сварки согласно типовому техпроцессу [232].

Поскольку в КД не содержится норм прочности сварного соединения, то (по умолчанию) на основании п. 2.3.13 ОСТ 92-1741, прочность

сварных соединений на срез должна быть не ниже 0,8 нижнего предела прочности соединяемого материала, имеющего меньшую прочность.

В сварном соединении используют нихромовую проволоку X20H80-H ГОСТ 12766.1 и шину из бериллиевой бронзы БрБ2 ГОСТ 15835 [233]. Как указано выше, для проволоки X20H80-H предел прочности по временному сопротивлению на разрыв нормируется только по верхнему значению (не более 102 кгс/мм²), а пруток бериллиевой бронзы нормируется по нижнему значению временного сопротивления разрыву не ниже 75 кгс/мм². Таким образом возникает неопределённость с применением требований п. 2.3.13 ОСТ 92-1741, поскольку не известно, какой из свариваемых материалов имеет меньшую прочность, что недопустимо для высокоответственных соединений. В том же стандарте для обеспечения и контроля прочности даны рекомендация по установлению требований к сварным соединениям с указанием норм прочности в КД.

Допустимое усилие вытягивания проволоки из-под прижимных шайб должно быть установлено в КД и его надлежит определять при периодических испытаниях на прочность сварных соединений, которые следует проводить на образцах-имитаторах или деталях, изготовленных в соответствии с требованиями КД (п. 2.3.14 ОСТ 92-1741).

Свойство проволоки 0,2 X20H80-H обеспечивать конструкционную прочность при возникновении индукционных токов. В обесточенной электрокабельной сети КА при пересечении магнитосферы Земли существует возможность возникновения наведённых индукционных токов. Значение величины индукционных токов пропорционально частоте и величине наводящего тока, площади, занимаемой рабочей электрической цепью, и обратно пропорционально квадрату расстояния до источника наводящего тока. Снижение эффекта наводки индукционных токов осуществляется двумя способами: за счёт использования в электрических цепях скрученных проводников или применения экранов из ферритовых материалов [234].

Ни один из способов снижения наведённых индукционных токов в конструкции УС не используется, а следовательно, они неизбежно будут возникать в обесточенной электрической цепи. При этом опасность в первую очередь связана не с возможностью перегорания проволоки 0,2 X20H80-H, а с тем, что при индукционных наводках проволока обязательно будет нагреваться. В этом случае для оценки отказоспособности при несанкционированном срабатывании актуатора прочность проволоки должна учитываться в зависимости от допустимых напряжений при совокупной температуре внешней окружающей среды (плюс 100 °С) и температуре тепловыделения проволоки в результате возникновения индукционных токов.

Очевидно, что оценка прочности проволоки при возникновении индукционных токов производится с учётом коэффициента безопасности,

в который, кроме множителя f_{δ}^* (2.74), должен входить множитель, учитывающий температурное воздействие на материал проволоки. Для этого необходимо провести дополнительный анализ наихудших сочетаний факторов (углов пересечения магнитосферы, скорости движения, состояния радиационных поясов и т. п.) на случай возникновения индукционных токов в электрических цепях актуатора УС при пересечении магнитосферы Земли.

Свойство конструкции УС обеспечивать приведение всех его частей к одному электрическому потенциалу. При эксплуатации космического аппарата существует большая вероятность возникновения свободных поверхностных электрических зарядов. Пробой электрических цепей электростатическим разрядом может стать причиной несанкционированного срабатывания УС. Для предотвращения отказов вследствие электростатического пробоя в ракетно-космической технике используют меры защиты от статического электричества согласно ОСТ 92-1615 [235].

В частности, конструкция УС должна иметь металлический корпус для предварительного уравнивания электростатических потенциалов (п. 5.3 ОСТ 92-1615) и металлизацию для приведения электростатического поля к одному электрическому потенциалу согласно ГОСТ 19005 [236] (по ссылке на п. 5.7 ОСТ 92-1615).

В конструкции УС не предусмотрены меры по металлизации корпусов актуатора и держателя. Таким образом конструкция УС не имеет защиты от статического электричества. В силу кратковременного пребывания в условиях электростатического воздействия (до 48 ч) вероятность электростатического пробоя невелика, однако выполнение требований по защите электронных устройств от статического электричества согласно ОСТ 92-1615 позволило бы гарантированно исключить данный вид отказа.

Свойство конструкции держателя препятствовать возникновению несанкционированного поворота кронштейна держателя. Сначала определим *параметры, обеспечивающие удержание и срабатывание держателя*. Запирающее усилие ролика держателя в исходном положении (см. рис. 6.4), соответствующее начальному тангенциальному усилию пружины, определяется по формуле

$$P_3 = F_n \cdot \operatorname{tg} \alpha, \quad (6.6)$$

где F_n – начальное усилие на пружине держателя, получаемое в результате настройки держателя при сборке (вычисляемая величина); $\alpha = 2^\circ$ (вычисляемая величина).

Сила сопротивления перемещению роликов, препятствующая срабатыванию держателя (см. рис. 6.4), складывается из пяти составляющих:

- 1) запирающее усилие ролика в исходном положении (6.6);

2) тангенциальная составляющая силы, возникающей в результате сжатия пружины держателя при перемещении ролика держателя:

$$F_{\tau} = \Delta F \cdot \operatorname{tg} \alpha, \quad (6.7)$$

здесь $\Delta F = k \cdot \Delta l$, $k = \frac{F_2 - F_1}{h}$,

где F_1 – сила пружины держателя при предварительной деформации, $F_1 = 6$ кгс; F_2 – сила пружины при рабочей деформации, $F_2 = 10$ кгс; h – рабочий ход пружины (разность между рабочей и предварительной деформацией), $h = 7$ мм; k – жёсткость пружины; $k = 0,571$ кгс/мм; Δl – величина сжатия пружины держателя (вычисляемая величина, которая зависит от положения ролика);

3) тангенциальная составляющая силы, возникающей в результате сопротивления перемещению штока держателя под действием поперечной силы R на его свободном конце:

$$F_{R\tau} = F_R \cdot \operatorname{tg} \alpha, \quad (6.8)$$

здесь $F_R = R \cdot \mu$, где μ – коэффициент трения в парах трения «шток–корпус» (задаваемая величина); R – поперечная сила на конце штока, $R = 10,2$ кгс;

4) сила трения при сдвиге ролика держателя вдоль стенки корпуса держателя

$$F_{\text{тр}1} = F \cdot \mu, \quad (6.9)$$

здесь $F = F_n + \Delta F + F_R$, где F – усилие, сжимающее ролик; μ – коэффициент трения в парах трения «ролик–шайба» (задаваемая величина);

5) сила трения при сдвиге ролика держателя по шайбе штока

$$F_{\text{тр}2} = \frac{F}{\cos \alpha} \cdot \mu. \quad (6.10)$$

С учётом (6.6)–(6.10) суммарная сила сопротивления перемещению роликов держателя определяется по формуле

$$T = F \cdot \left[\mu \cdot \left(1 + \frac{1}{\cos \alpha} \right) + \operatorname{tg} \alpha \right]. \quad (6.11)$$

Для вычисления максимального сжатия пружины держателя используется расчётная схема силового удержания и освобождения роликов (см. рис. 6.4), при условии $F = F_k$:

$$\Delta l = r \cdot (1 - \cos \alpha) + h_1 \cdot \operatorname{tg} \alpha,$$

здесь $h_1 = h - r \cdot \sin \alpha$,

$$h = \frac{D - d}{2} - r, \quad (6.12)$$

где r – радиус ролика держателя, $r = 1$ мм; d – диаметр упора в штоке под ролик держателя, $d = 4,8h9$ мм; D – диаметр шайбы штока держателя, $D = 11h10$ мм; h_1 – максимальная высота подъема ролика между точками касания с шайбой, $h_1 = 2,065$ мм (вычисленный размер), h – разница между исходным и конечным положениями ролика, $h = 2,1$ мм (вычисленный размер); Δl – искомый размер, $\Delta l = 0,073$ мм (вычисленный размер).

Для определения начального усилия на пружине держателя F_n необходимо провести вспомогательные расчёты размерной цепи по формуле

$$b_1 - b_2 - b_3 - b_4 - B - b_5 - b_6 = 0, \quad (6.13)$$

где b_1 – габаритный размер корпуса держателя, $b_1 = 29,5_{-0,21}$ мм; b_2 – толщина стенки кронштейна в месте опирания ролика держателя, $b_2 = 1,5 \pm 0,2$ мм; b_3 – вычисляемый размер опорного устройства, $b_3 = 8_{-0,35}^{+0,1}$ мм (расчёт размерной цепи не приведён); b_4 – вычисляемый размер, равный толщине шайбы штока в месте касания ролика держателя; B – искомый размер, определяющий степень начального сжатия пружины держателя; b_5 – размер втулки, входящий в размерную цепь, $b_5 = (3,5 \pm 0,2)$ мм; b_6 – настраиваемый размер (размер Б), $b_6 = 0,2^{+0,1}$ мм.

Размер b_4 без учёта толщины ТСП вычисляют по формуле

$$b_4 = t - h_1 \cdot \operatorname{tg} \alpha,$$

где t – толщина шайбы штока держателя, $t = 1,5 \pm 0,2$ мм; h_1 – см. (6.12); b_4 – искомый размер, $b_4 = 1,428$ мм (вычисленный размер).

Исходя из номинального размера начального сжатия пружины держателя $B = 14,872$ мм, вычисленного по (6.13), начальная сила пружины определяется по силовой диаграмме пружины как $F_n = 8,752$ кгс.

Коэффициент трения μ в формулах (6.8)–(6.10) и соответственно в (6.11) задаётся исходя из условий функционирования УС в вакууме при давлении от $1,33 \cdot 10^{-6}$ до $1,33 \cdot 10^{-8}$ Па (от 10^{-8} до 10^{-10} мм рт. ст.) и температурах от минус 100° до плюс 100° С. С учётом новейших исследований, коэффициент трения в парах трения с ВНИИ НП-212 зависит от давления и температуры окружающей среды, причём с повышением температуры коэффициент трения уменьшается [237].

При температурах в вакууме до плюс 100° С термодинамическая зависимость коэффициента трения μ от температуры трения $T_{\text{тр}}$ (температуры окружающей среды) имеет вид⁵

$$\mu = 0,381 \cdot T_{\text{тр}}^{-0,41}. \quad (6.14)$$

⁵ Формула приведена на основе информации, предоставленной 17.11.2016 Петром Николаевичем Хопиным (кандидатом технических наук, доцентом кафедры технологии проектирования и производства двигателей летательных аппаратов, МАИ).

Общая тенденция поведения коэффициента трения в парах трения с ВНИИ НП-212 при отрицательных температурах сводится к увеличению коэффициента трения с понижением температуры окружающей среды [238; 239]. Коэффициент трения ВНИИ НП-212 при отрицательных температурах с учётом «стоп-эффектов», т. е. увеличения момента трения при страгивании в зависимости от временного интервала нахождения узла трения в неработающем состоянии, может достигать средних значений 0,23 и пиковых значений – до 0,27 [238]. Исходя из сказанного при проведении расчётов надёжности коэффициент трения в парах трения с ВНИИ НП-212 при температуре окружающей среды равной минус 100 °С (с учётом «стоп-эффектов») принимается не ниже $\mu = 0,3$. Значит, значение запирающего усилия в исходном положении держателя согласно уравнению (6.6) равно $P_3 = 0,305$ кгс.

Условие самоторможения в паре трения «ролик–шайба» имеет вид [161]

$$\alpha_0 < \varphi_0, \quad (6.15)$$

здесь $\varphi_0 = \arctg \mu$,

где α – угол приложения силы между нормалью и поверхностью трения; φ_0 – угол трения.

Согласно (6.14) минимальный коэффициент трения ВНИИ НП-212 при температуре плюс 100 °С может соответствовать значению $\mu = 0,058$, с учётом чего $\varphi_0 = 3,3^\circ$. Таким образом условие самоторможения в паре «ролик – шайба» выполнено $\alpha < \alpha_0 < \varphi_0$.

Далее опишем оценки рисков срабатывания держателя.

1) *При действии инерционных и динамических нагрузок на активном участке.*

Кронштейн держателя в стартовом положении УС находится в консольном положении согласно рис. 6.7.

Сила $P_{пр}$, действующая на конце консоли, приводит к редуцированию усилия P , обеспечивающего подъём ролика держателя по шайбе штока (рис. 6.8):

$$P = \frac{P_{пр} \cdot l}{l_1},$$

здесь $P_{пр} = m_{пр} \cdot g \cdot n$, $m_{пр} = 0,25$ т,

где l – длина консоли кронштейна до оси поворота, $l = 30,8$ мм; l_1 – расстояние от точки касания ролика и шайбы штока до оси поворота, $l_1 = 13,1$ мм; $m_{пр}$ – приведенная масса кронштейна; m – масса кронштейна, $m = 0,002$ кг; g – ускорение свободного падения, n – перегрузка.

При перегрузке $n = 25$ согласно техническому заданию усилие, действующее на ролик, равно $P = 0,03$ кгс.

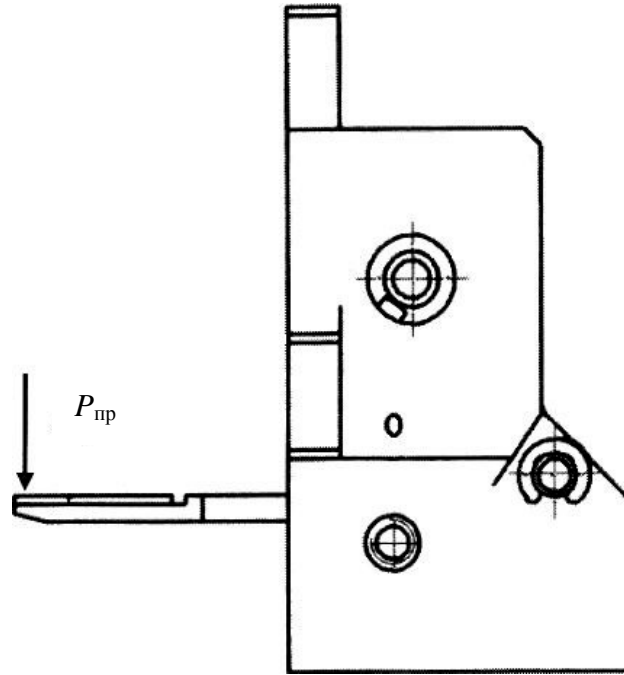


Рис. 6.7. Схема действия инерциальных и динамических нагрузок $P_{пр}$ на кронштейн держателя

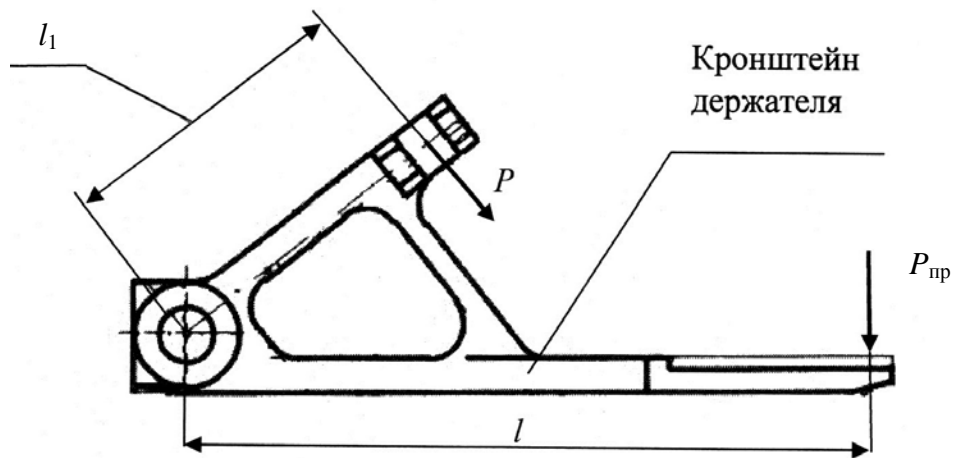


Рис. 6.8. Схема для расчёта редуцированного усилия P

Условие сохранения консольного положения кронштейна с учётом (6.11) определяется неравенством

$$P < T, \quad (6.16)$$

которое обеспечивает сохранение консольного положения кронштейна под действием на его консольную часть инерционных и динамических нагрузок активного участка полёта.

Оценка рисков срабатывания держателя при действии инерционных и динамических нагрузок активного участка производится «в запас» (без учёта сил трения). В этом случае уравнение (6.11) принимает вид

$$T = (F_n + \Delta F) \cdot \operatorname{tg} \alpha,$$

соответственно с учётом вычисленных ранее параметров при $\Delta l = 0,073$ мм, получаем $T = 0,307$ кгс.

Таким образом, неравенство (6.16) выполняется с десятикратным запасом.

Однако, несмотря на то, что в конструкции держателя соблюдены условия самоторможения, сохранения консольного положения кронштейна при действии инерционных и динамических нагрузок активного участка и запирающего исходного положения, для положительного заключения об обеспечении заданной безотказности в исходном положении держателя при воздействиях и нагрузках на участке выведения этого недостаточно.

Соблюдение условий самоторможения и силового запирающего обеспечивает неподвижность фрикционных соединений только при действии квазистатических (инерционных и динамических) нагрузок, но исключать срабатывание держателя при вибрациях нельзя.

Для оценки рисков срабатывания держателя при воздействиях и нагрузках на участке выведения требуется оценка воздействия вибраций при вибрационном (синусоидальном и широкополосном случайном) и акустическом нагружении.

2) При воздействии вибраций на активном участке

В вибрационной механике [240] широко известен эффект самоотвинчивания гаек – проявление вибрационных перемещений (подвижности под действием вибрации номинально неподвижных деталей машин).

Самоотвинчивание гаек при вибрациях происходит, несмотря на соблюдение условий самоторможения в резьбе (6.15) и осуществление силовой (моментной) затяжки резьбового соединения. Поскольку эквивалентом силовой затяжки в конструкции держателя можно с полным основанием считать силовое запирающее ролика в исходном положении силой $P_3 = 0,305$ кгс, то оценку риска срабатывания держателя при воздействии вибраций на участке выведения можно производить по аналогии с резьбовыми соединениями, при этом линию перекачивания ролика по шайбе можно считать витком резьбы, вытянутым в линию. Следуя этой же аналогии для фрикционно-силового удержания держателя при воздействии вибраций необходимо применять блокировку вибрационных перемещений, например методами стопорения резьбовых соединений согласно ОСТ 92-1542 [241].

Поскольку никаких способов блокировки вибрационных перемещений кронштейна в конструкции держателя не предусмотрено, то нельзя ис-

ключать срабатывания держателя при вибрациях по аналогии с самоотвинчиванием гаек в резьбовых соединениях. Основными причинами возникновения эффекта вибрационных перемещений являются:

- асимметричность микросмещений и градиентов контактных деформаций сопряженных деталей;
- тангенциальная анизотропия ТСП;
- фазовые сдвиги амплитуд вибрационных перемещений сопряженных деталей и т. п.

В общем случае эффект вибрационных перемещений обусловлен наличием в технической системе одного или нескольких видов асимметрии: силовой, кинематической, структурной, градиентной, волновой или начальной [240].

В конструкции держателя присутствуют одновременно три вида асимметрии:

1) силовая (действие постоянной гравитационной (инерционной) силы в направлении поворота кронштейна держателя);

2) кинематическая (действие продольных асимметричных вибрационных перемещений подпружиненного штока, в опорах которого действуют переменные силы трения из-за меняющихся реакций в опорах от поперечной нагрузки на свободном его конце при микроперемещениях штока);

3) структурная (действие в ортогональных направлениях векторов возможных перемещений кронштейна и подпружиненного штока держателя).

При наличии указанных асимметрий при контактных взаимодействиях между роликом опорного устройства держателя и шайбой штока существует риск самосрабатывания держателя при действии вибраций активного участка, который усугубляется определёнными причинами.

Это влияние конструктивных и эксплуатационных факторов на риски срабатывания держателя при воздействии вибраций на участке выведения.

1) Влияние твёрдо-смазочного покрытия ВНИИ НП-212

Согласно требованиям, установленным в чертеже, твёрдо-смазочное покрытие ВНИИ НП-212 наносится слоем толщиной 5–15 мкм на ролик штока и на шайбу штока в зоне качения ролика, при этом на поверхность качения ролика по корпусу держателя смазка не нанесена. Покрытие смазкой ВНИИ НП-212 одновременно двух поверхностей пары трения не изменяет значений коэффициента трения, но способно существенно снизить величину сжатия пружины.

По ОСТ 92-4556 (п. 1.6) [99] толщина слоя ВНИИ НП-212 должна быть 15–25 мкм. Поскольку требования чертежа противоречат рекомендациям ОСТ 92-4556, то возможно возникновение случая, когда толщина

слоя смазки в 5–25 мкм является в равной степени правомерной (свыше 5 мкм – соответствует требованиям чертежа, и до 25 мкм включительно – рекомендациям НТД). Причём согласно указаниям ОСТ 92-4556 детали с труднодоступной для измерения поверхностью измерениям не подвергаются.

Указанные неувязки и противоречия по нанесению ВНИИ НП-212 могут привести к неравномерности нанесения покрытия по поверхности шайбы штока и послужить причиной снижения сжатия пружины с 0,073 мм до как минимум 0,053 мм (на величину разброса возможных толщин ТСП согласно НТД и КД).

2) Влияние угла наклона шайбы

При выполнении условия (6.15) не существуют такие силы, которые, образуя с нормалью угол α_0 меньше угла трения φ_0 , смогли бы сдвинуть тело вдоль поверхности сопряжения. Исходя из этого вибрационные перемещения, накопленные в процессе вибраций, способны суммироваться и приводить к несанкционированному срабатыванию держателя. Иная ситуация наступает, когда

$$\alpha > \alpha_0 > \varphi_0. \quad (6.17)$$

В этом случае, напротив, любая сила меньше запирающего усилия P_3 , определенного по формуле (6.6), будет приводить ролик в исходное положение.

Гарантированное выполнение условия (6.17) требует экспериментального подтверждения коэффициентов трения ВНИИ НП-212 в заданных условиях эксплуатации. Однако если предположить, что максимально возможный коэффициент трения ВНИИ НП-212 при эксплуатации не превысит $\mu = 0,3$, то угол наклона шайбы должен быть больше $16,7^\circ$.

3) Влияние формы поверхности качения ролика по корпусу

Поскольку максимальное сжатие пружины при срабатывании держателя составляет $\Delta l = 0,073$ мкм, что сравнимо со значениями неуказанных допусков форм, последние должны быть заданы в чертеже в явном виде.

Неуказанный допуск неперпендикулярности поверхности качения ролика по корпусу к оси вращения кронштейна способен привести как к уменьшению, так и к увеличению запирающего усилия ролика. Поэтому на поверхности корпуса держателя, ограниченного размером $\varnothing 11,5H9$, следует установить допуск перпендикулярности поверхности качения ролика по корпусу с осью не менее 0,08 мкм на базовой длине не менее указанного размера 11,5 мм.

4) Влияние запирающего усилия ролика в исходном состоянии на срабатывание держателя

Как уже было сказано, тангенциальная сила от пружины (запирающее усилие) в исходном состоянии $P_3 = 0,305$ кгс, которое в конце сраба-

тивания увеличивается до 0,307 кгс, а максимальная сила сопротивления перемещению ролика в момент срабатывания держателя по формуле (6.11) может достигать значения $T = 7,528$ кгс (при условии $\mu = 0,3$). Таким образом доля запирающего усилия в общей силе сопротивления ролика может составлять не более 4,1 %, что практически не отличается от схемы фрикционного запираения ролика.

5) Влияние условий проведения испытаний держателя при наземной экспериментальной отработке

Риски возникновения вибрационных перемещений в держателе максимальны в областях высоких частот вибрационных нагрузок, поэтому ограничение синусоидального нагружения при вибрационных испытаниях частотой 100 Гц согласно ТЗ не способствует эффективности вибрационной отработки, поскольку необоснованно отбрасывается опасный спектр реальных вибрационных нагрузок при штатной эксплуатации. Вибрационные испытания держателя целесообразно производить в диапазоне частот до 2 500 Гц.

Кроме того, недопустимо проводить вибрационные испытания с установленным съёмным элементом согласно программе и методике проведения испытаний, что не позволяет выявить возможность появления вибрационных перемещений при вибрационном нагружении держателя.

Из всего описанного выше можно сделать выводы относительно возможности срабатывания держателя при воздействии вибраций на участке выведения. Единственной причиной возникновения вибрационных перемещений является наличие трения. В случае прямого приложения запирающего усилия с помощью пружины проблема несанкционированного срабатывания исключается полностью. Поэтому модель запираения ролика тангенциальной составляющей от пружины практически ничем не отличается от модели резьбового соединения с силовой затяжкой, следовательно, риск несанкционированного срабатывания держателя при воздействии вибраций на участке выведения достаточно высокий. Параметры, характеризующие запираение ролика (усилие запираения, доля запирающего усилия в сопротивлении ролика, сжатие пружины, высота подъёма ролика при срабатывании), не гарантируют невозможность несанкционированного срабатывания.

Количественной характеристикой рассматриваемого свойства будет вероятность (как степень уверенности в невозможности несанкционированного срабатывания).

Единственным способом относительного снижения риска несанкционированного срабатывания держателя является увеличение угла наклона шайбы штока, что одновременно увеличивает риск отказа при штатном срабатывании актуатора.

В любом случае для количественной оценки вероятности сохранения запирающего ролика держателя штоком при воздействиях и нагрузках на участке наведения необходимо:

- установить в КД требование по снятию съёмного элемента перед проведением вибрационных испытаний на синусоидальное и широкополосное случайное воздействие;
- провести как минимум дополнительные исследовательские испытания держателя на синусоидальную и широкополосную случайную вибрацию с повышенным уровнем нагрузок и временем испытаний (например, не менее 125 % по уровню нагрузок и не менее 200 % по времени испытаний) в диапазоне частот 5–2 500 Гц, желательна с видео- (фото-) контролем сопряжения ролика с шайбой штока;
- по результатам дополнительных вибрационных испытаний дать заключение о надёжности запирающего ролика держателя штоком.

Свойство пружины актуатора обеспечивать ход, необходимый для срабатывания держателя. При установке актуатора (см. рис. 6.1) регулировкой корпуса держателя относительно корпуса актуатора обеспечивается размер Б, при этом шток актуатора выдвинут на максимальный размер Г.

После срабатывания шток актуатора должен обеспечить поворот кронштейна держателя до полного схода ролика держателя с шайбы штока. Ход штока актуатора определяется с помощью расчётной схемы, приведенной на рис. 6.9.

Для поворота кронштейна держателя при подъёме ролика по шайбе штока требуется обеспечить перемещение штока держателя, равное

$$H_2 = H_{21} + Б,$$

$$\text{здесь } H_{21} = C \cdot \operatorname{tg} \gamma, \quad \gamma = 2 \arcsin \frac{h_2}{2C}, \quad h_2 = \frac{C \cdot h}{l_1},$$

где H_2 – минимальное требуемое перемещение штока актуатора; h_2 – перемещение точки, удаленной от оси вращения при угле поворота γ , соответствующем высоте подъема ролика равного h ; C – расстояние от оси вращения кронштейна до точки, соосной с осью симметрии штока актуатора; h – высота подъёма ролика, $h = 2,1$ мм (см. рис. 6.4); l_1 – расстояние от точки касания ролика и шайбы штока до оси поворота, $l_1 = 13,1$ мм (рис. 6.9); Б – зазор между штоком актуатора и кронштейном держателя, который настраивается при установке актуатора, Б = (0,3 ± 0,2) мм.

Положение точки приложения силы в момент надавливания штока актуатора на кронштейн держателя относительно оси поворота определяется расчётом размерной цепи и равен $C = 27,7_{-0,05}^{+0,05}$ мм (расчёт размерной цепи не приведён).

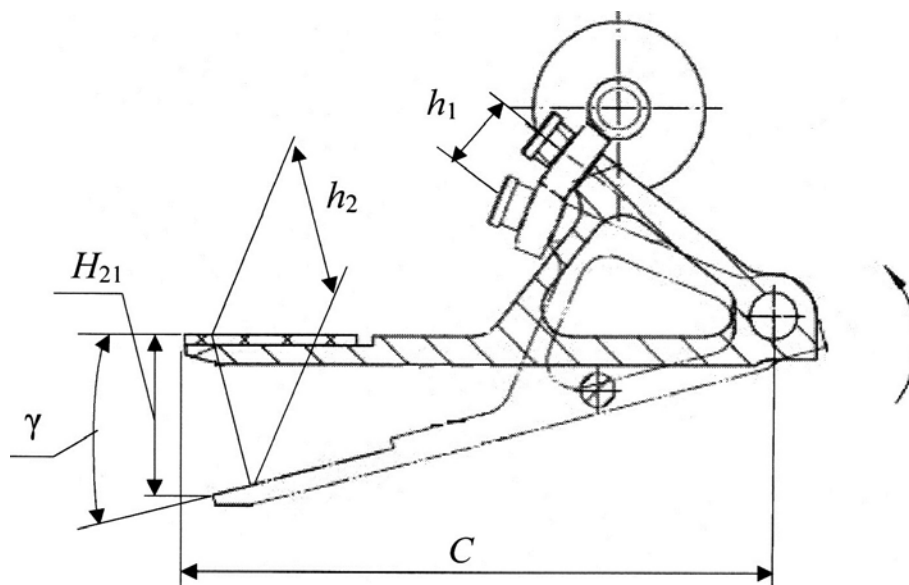


Рис. 6.9. Расчётная схема для определения хода штока без учёта размера Б

Таким образом, ход штока актуатора при угле поворота кронштейна $\gamma = 9,19^\circ$ составляет не менее $H_2 = 4,8$ мм, причём в конце хода момент сопротивления повороту кронштейна держателя будет иметь максимальное значение при минимальном усилии пружины актуатора.

Свойство пружины актуатора обеспечить заданный запас движущего момента для поворота кронштейна держателя. Расчёт запаса движущих моментов при срабатывании УС произведён в Р12, но поскольку там не были учтены все составляющие формулы (6.11) и расчёт проводился при коэффициенте трения $\mu = 0,15$, то существует необходимость в дополнительных расчётах.

Момент сопротивления от силы T , приведённый к оси вращения кронштейна, равен

$$M_{c1} = T \cdot l_1,$$

где l_1 – плечо действия силы T (см. рис. 6.8).

Момент сопротивления от силы T на оси вращения кронштейна будет

$$M_{c2} = T \cdot \frac{d_1}{2} \cdot \mu,$$

где d_1 – диаметр оси вращения корпуса держателя, $d_1 = 2,5d_9$ мм.

При ходе $H_2 = 4,8$ мм, номинальное значение силы пружины актуатора в момент срабатывания держателя будет не более $F_{пр1} = 1,58$ кгс.

Момент сопротивления от силы $F_{пр1}$ на оси вращения кронштейна равен

$$M_{c3} = F_{\text{пр1}} \cdot \frac{d_1}{2} \cdot \mu.$$

Приведём суммарный момент сопротивления повороту кронштейна при срабатывании одного штока:

$$M_c = M_{c1} + M_{c2} + M_{c3}.$$

Движущий момент, создаваемый одним штоком, будет

$$M_{\text{дв}} = F_{\text{пр1}} \cdot C,$$

где C – плечо действия силы $F_{\text{пр1}}$ (рис. 6.9), $C = 27,7$ мм.

Суммарный момент сопротивления повороту кронштейна при срабатывании четырёх штоков равен

$$M_{\Sigma c} = M_{c1} + M_{c2} + 4M_{c3}.$$

Определим суммарный движущий момент, создаваемый четырьмя штоками:

$$M_{\Sigma \text{дв}} = 4M_{\text{дв}}.$$

Запас движущего момента при срабатывании одного штока будет

$$k = \frac{M_{\text{дв}}}{M_c}.$$

Запас движущего момента при срабатывании четырёх штоков равен

$$k_{\Sigma} = \frac{M_{\Sigma \text{дв}}}{M_{\Sigma c}}.$$

Результаты расчёта запаса движущих моментов при срабатывании одного и четырёх штоков с разными значениями коэффициентов трения приведены в табл. 6.2.

Таблица 6.2

Результаты расчёта запаса движущего момента
при срабатывании актуатора

Параметры	$\mu = 0,15$ (принятые в Р12)	$\mu = 0,3$ (соответствующие худшему случаю при температуре минус 100 °С)
T , кгс	3,458	7,528
M_{c1} , кгс·мм	45,299	98,617

Параметры	$\mu = 0,15$ (принятые в Р12)	$\mu = 0,3$ (соответствующие худшему случаю при температуре минус 100 °С)
M_{c2} , кгс·мм	0,648	2,823
M_{c3} , кгс·мм	0,29	0,59
M_c , кгс·мм	46,23	102,03
$M_{дв}$, кгс·мм	43,77	
k	0,95	0,43
$M_{\Sigma c}$, кгс·мм	47,11	103,8
$M_{\Sigma дв}$, кгс·мм	173,76	
k_{Σ}	3,69	1,67

Основываясь на проведённых расчётах ясно, что запас движущих моментов существенно ниже требуемого (не менее 200 % (отношение 3:1) для наихудшего случая) и не соответствует требованию по срабатыванию хотя бы одного из штоков актуатора.

Свойство пружины держателя обеспечить заданный запас движущего усилия для перемещения штока держателя. Условие по запасу движущего усилия пружины держателя согласно ТЗ должно выполняться на полном ходе штока держателя, равном $D = 9$ мм.

В случае начального сжатия пружины держателя на момент срабатывания штока, равного $F_n = 8,752$ кгс, в конце хода штока $D = 9$ мм пружина обеспечит усилие $F_k = 2,752$ кгс. Суммарное сопротивление перемещению штока держателя в начале и в конце хода можно считать постоянным и равным

$$F_R = R \cdot \mu.$$

Принимая значение коэффициента трения равным $\mu = 0,3$, запас движущего усилия пружины держателя в конце движения штока будет

$$k = \frac{F_k}{F_R} = \frac{2,752}{3,06} = 0,9,$$

причём в начале движения штока запас движущего усилия пружины равен

$$k = \frac{F_n}{F_R} = \frac{8,752}{3,06} = 2,86,$$

что в обоих случаях не соответствует требованию по запасу срабатывания (не менее 200 % (отношение 3:1) для наихудшего случая).

Таблица 6.3

Результаты анализа необходимости и достаточности требований, установленных в конструкторской документации
для безусловного выполнения требуемых функций

Показатели или параметры, характеризующие свойства, которые обеспечивают безотказность	Значения показателей и параметров, при которых обеспечивается работоспособность	Критерии установления предельных значений показателей и параметров	Обоснование критериев	Документ, в котором приводится обоснование или подтверждение значений показателей и параметров	Требования в КД во исполнение заданных значений показателей и параметров	Выводы
Допустимое усилие разрушения проволоки 0,2 Х20Н80-Н	Действующее усилие в проволоке должно быть ниже усилия разрушения проволоки по пределу текучести материала	Длительное (до 8,5 лет) хранение проволоки под нагрузкой	Выполнение условий прочности проволоки по пределу текучести	В Р14 расчёты проволоки на прочность отсутствуют	В КД отсутствуют указания по нормам прочности для проволоки	Требования в КД не установлены
Допустимое усилие вытягивания проволоки 0,2 Х20Н80-Н из-под прижимных шайб гаечного винтового зажима	Действующее усилие в проволоке должно быть ниже прочности сварных соединений проволоки с шинами	Предел прочности сварного соединения на срез	Выполнение условий прочности на срез сварного соединения	В Р14 расчёт прочности сварного соединения на срез отсутствует	В КД отсутствуют указания по нормам прочности сварного соединения проволоки с шинами	Требования в КД не установлены
Вероятность сохранения конструкционной прочности проволоки 0,2 Х20Н80-Н с учётом индуктивных наводок	≈1,0 (исходя из требований по безотказности)	Недопустимость разрушений проволоки с учётом индуктивных наводок	Выполнение условий прочности проволоки по пределу текучести с учётом индуктивных наводок	В Р14 расчёты проволоки на прочность с учётом индуктивных наводок отсутствуют	В КД отсутствуют указания по нормам прочности для проволоки с учётом индуктивных наводок	Требования в КД не установлены

Показатели или параметры, характеризующие свойства, которые обеспечивают безотказность	Значения показателей и параметров, при которых обеспечивается работоспособность	Критерии установления предельных значений показателей и параметров	Обоснование критериев	Документ, в котором приводится обоснование или подтверждение значений показателей и параметров	Требования в КД во исполнение заданных значений показателей и параметров	Выводы
Вероятность невозникновения электростатического пробоя	$\approx 1,0$ (исходя из требований по безотказности)	Недопустимость электростатического пробоя	Выполнение общепринятых норм по защите от статического электричества	ОСТ 92-1615	Требования по исполнению норм защиты от статического электричества в КД не предусмотрены	Требования в КД не установлены
Вероятность записания ролика штоком держателя при воздействиях и нагрузках активного участка	$\approx 1,0$ (исходя из требований по безотказности)	Недопустимость несанкционированного раскрытия УС	Выполнение условия безотказности УС	Выполнение критерия безотказности в P12 не подтверждено	В КД отсутствуют указания по НЭО для случая несанкционированного раскрытия УС	Требования в КД не установлены
Допустимый ход пружины актуатора	$>4,8$ мм (исходя из условий редуцирования кронштейна и его сопряжения со штоком)	Минимально допустимый ход пружины, обеспечивающий сход ролика с шайбы штока	Выполнение условия функционирования УС	Расчёт размерных цепей P15 по ОСТ 91-0290 не произведён	Требования в КД не предусмотрены	Проведённые расчёты показывают, что требование выполнено
Допустимый запас движущего момента при действии одной из четырёх пружин актуатора	>3 при условии срабатывания одного штока (согласно требованиям ТЗ)	Сложившаяся практика проектирования МОС	Выполнение условия энергодостаточности пружины актуатора в худших условиях применения	Расчёт надёжности P12 выполнен с ошибками	Требования не выполнены	

Показатели или параметры, характеризующие свойства, которые обеспечивают безотказность	Значения показателей и параметров, при которых обеспечивается работоспособность	Критерии установления предельных значений показателей и параметров	Обоснование критериев	Документ, в котором приводится обоснование или подтверждение значений показателей и параметров	Требования в КД во исполнение заданных значений показателей и параметров	Выводы
Допустимый запас движущего усилия для перемещения штока держателя	>3 (согласно требованиям ТЗ)	Сложившаяся практика проектирования МОС	Выполнение условия энергодостаточности пружины держателя в худших условиях применения	В расчёте надёжности Р12 обоснование выполнения требования по запасу движущего усилия отсутствует	Требования не выполнены	
Вероятность заклинивания штока актуатора в направляющей втулке	0 (исходя из требований по безотказности)	Недопустимость заклинивания штока	Выполнение условия функционирования актуатора	Нет конструкторского документа, где приводится обоснование или подтверждение показателя	Как показывают приведенные расчёты, установленные зазоры сопряжения штока обеспечивают заданную безотказность	
Вероятность демонтажа съёмных элементов при работах с УС	≈1,0 (исходя из требований по безотказности)	Недопустимость отказа	Выполнение условия функционирования УС при срабатывании	Нет конструкторского документа, где приводится обоснование или подтверждение показателя	Требований в ТУ по демонтажу съёмных элементов при подготовке КА к пуску не предусмотрено	Требования в КД не установлены

Свойство сопряжения штока актуатора и втулки образовывать сопряжение с зазором больше размера капель расплавленного металла, возникающих в результате перегорания проволоки. При перегорании проволоки неизбежно образуются капли расплавленного металла, которые со взрывной скоростью распространяются в окружающем пространстве и могут прилипнуть к поверхности металлических деталей. В частности, через прорезь 1,6H12 в корпусе расплавленный металл может попасть на цилиндрическую часть штока актуатора, образуя наросты, способные привести к заклиниванию штока в направляющей втулке.

Предположим, что высота нароста каждой из капель в поперечном сечении будет не больше диаметра проволоки. Значит, диаметр штока может быть равен $D = (2h_{12} + 0,2)$ мм, т. е. $D_{\text{макс}} = 2,2$ мм.

Внутренний диаметр втулки выполнен по свободному допуску H14, который составляет 2,5 мм, что обеспечивает более чем двойной запас по радиальному зазору и, соответственно, требуемую вероятность свободного перемещения штока во втулке.

Свойство съёмных элементов привлекать внимание персонала. Винт съёмного элемента относится к съёмному оборудованию, а именно к группе предохранительных и блокировочных устройств, предохраняющих от случайных срабатываний механизмов и систем КА (чеки, упоры, струбцины и т. п.) [242].

Согласно ОСТ 92-4798 внимание персонала при работе со съёмным оборудованием должно быть привлечено сигнальными покрытиями и сигнальными знаками (п. 2.2 и 2.3 ОСТ 92-4798). В чертеже на съёмный элемент сигнальная окраска нанесена на винт, однако требований по установке сигнальных знаков (флажков) на сборочном чертеже спускового устройства не предусмотрено, что не соответствует п. 4.1.1 ОСТ 92-4798. Кроме того, в технических условиях на УС не установлено требований по демонтажу съёмного элемента при подготовке КА к пуску.

6.2.7. Оценка безотказности устройства спускового

По результатам проведения КТАН было выявлено $n = 10$ свойств КЭ, проявление которых влияет на безотказность функционирования устройства спускового. Структурная схема расчёта надёжности УС представляет собой блок-схему с последовательным соединением элементов в виде событий C_i , заключающихся в проявлении заданных свойств КЭ.

На основании (5.16) безотказность УС находят по формуле

$$P_{\text{ус}}(C) = P\left(\bigcap_{i=1}^n C_i\right) = \prod_{i=1}^n P(C_i). \quad (6.18)$$

Таблица 6.4

Оценка вероятностей отказов и соответствующих им значений вероятности безотказной работы устройства спускового

Свойства, обеспечивающие безотказность УС	Событие	Виды отказов по вероятности возникновения за время эксплуатации	Ожидаемая вероятность отказов	Ожидаемая ВБР	Экспертная оценка ВБР $P(C_i)$	Примечание
Свойство проволоки 0,2 X20H80-Н обеспечивать конструкционную прочность при нагружении пружиной актуатора	C_1	Высокая вероятность отказов	От 0,01 до 0,1	От 0,99 до 0,9	0,95	Экспертная оценка приведена с учётом анализов, приведенных на с. 240
Свойство заделки концов проволоки 0,2 X20H80-Н выдерживать нагрузку от действия пружины актуатора	C_2	Отказ вполне вероятен	От 0,005 до 0,01	От 0,995 до 0,99	0,99	Экспертная оценка приведена с учётом анализов, приведенных на с. 242
Свойство проволоки 0,2 X20H80-Н обеспечивать конструкционную прочность при возникновении индукционных токов	C_3	Отказ маловероятен	От 0,000 05 до 0,001	От 0,999 95 до 0,999	0,999 95	Экспертная оценка приведена с учётом анализов, приведенных на с. 243
Свойство конструкции УС обеспечивать приведение всех его частей к одному электрическому потенциалу	C_4	Отказ маловероятен	От 0,000 05 до 0,001	От 0,999 95 до 0,999	0,999 95	Экспертная оценка приведена с учётом анализов, приведенных на с. 244
Свойство конструкции держателя препятствовать возникновению несанкционированного поворота кронштейна держателя	C_5	Отказ возможен	От 0,001 до 0,005	От 0,999 до 0,995	0,995	Экспертная оценка приведена с учётом анализов, приведенных на с. 244
Свойство пружины актуатора обеспечивать ход, необходимый для срабатывания держателя	C_6	Отказ маловероятен	От 0,000 05 до 0,001	От 0,999 95 до 0,999	0,999 9	Экспертная оценка приведена с учётом анализов, приведенных на с. 253

Окончание табл. 6.4

Свойства, обеспечивающие безотказность УС	Событие	Виды отказов по вероятности возникновения за время эксплуатации	Ожидаемая вероятность отказов	Ожидаемая ВБР	Экспертная оценка ВБР $P(C_i)$	Примечание
Свойство пружины актуатора обеспечить заданный запас движущего момента для поворота кронштейна держателя	C_7	Отказ вполне вероятен	От 0,005 до 0,01	От 0,995 до 0,99	0,995	Экспертная оценка приведена с учётом анализов, приведенных на с. 254
Свойство пружины держателя обеспечить заданный запас движущего усилия для перемещения штока держателя	C_8	Умеренная вероятность отказа	От 0,005 до 0,001	От 0,995 до 0,999	0,999	Экспертная оценка приведена с учётом анализов, приведенных на с. 256
Свойство сопряжения штока актуатора и втулки образовывать сопряжение с зазором больше размера капель расплавленного металла, возникающих в результате перегорания проволоки	C_9	Вероятность отказа ничтожна мала	Менее 0,000 05	≈ 1	≈ 1	Экспертная оценка приведена с учётом анализов, приведенных на с. 260
Свойство съёмных элементов привлекать внимание персонала	C_{10}	Отказ маловероятен	От 0,000 05 до 0,001	От 0,999 95 до 0,999	0,999 95	Экспертная оценка приведена с учётом анализов, приведенных на с. 260

Вероятность осуществления каждого из событий $P(C_i)$ определяется тем, насколько параметр или показатель, количественно характеризующий рассматриваемое свойство КЭ, определен в границах своих значений, обоснован расчётами и обусловлен установленными в КД требованиями к изготовлению при производстве.

Для определения значений $P(C_i)$ используют метод экспертных оценок с применением шкалы балльных оценок критичности отказов согласно ГОСТ 27.310. Результаты экспертных оценок $P(C_i)$ приведены в табл. 6.4.

Вероятность события C_3 , заключающегося в проявлении свойства проволоки 0,2 X20H80-N обеспечивать конструкционную прочность при возникновении индукционных токов, учитывалась как условная вероятность

$$P(C_3) = P(C_3 | C_1). \quad (6.19)$$

На основании проведённых анализов безотказность УС оценивается по формуле (6.18) с учётом (6.19), а также данных, приведённых в табл. 6.4, и составляет величину, равную

$$P_{yc}(C) = \prod_{i=1}^{10} P(C_i) = 0,93.$$

6.2.8. Выводы по результатам анализа надёжности устройства спускового

Согласно проведённым исследованиям можно сформулировать результаты анализа и оценки надёжности устройства спускового.

1. Анализ показал, что конструкция УС заданным требованиям к безотказности не соответствует. В результате экспертной оценки установлено, что ВБР устройства спускового составляет 0,93 против 0,999 995 согласно установленным требованиям.

2. Анализ надёжности указывает на высокую способность актуатора к отказам в исходном положении, причём отказ любого из четырёх штоков актуатора способен привести к отказу механической системы в целом, т. е. к несанкционированному срабатыванию. Это напрямую вытекает из графического представления условий нахождения актуатора в работоспособном состоянии в виде структурной схемы надёжности.

Структурная схема надёжности свидетельствует о недооценке вероятности несанкционированного срабатывания актуатора. В исходном положении четыре штока образуют цепь последовательно соединённых элементов, и одновременно эти же четыре штока образуют цепь с параллельным соединением элементов при срабатывании. Причём в КД в полной мере установлены требования по контролю электрических параметров сра-

батывания штоков, имеющих четырёхкратное резервирование при срабатывании, но не предусмотрены требования по контролю механических параметров штоков, несмотря на то, что для обеспечения работоспособности штоков не применено никаких способов резервирования на случай воздействий и нагрузок в исходном положении.

3. Удерживание штоков от срабатывания осуществляется проволокой для пережигания с ненормированными характеристиками свойств прочности, причём в расчётах на прочность Р14 не предусмотрен расчётный случай нагружения проволоки, а в КД не установлены нормы прочности, что создает риски возникновения неоправданных отказов.

4. На удержание штоков от срабатывания влияет прочность сварных соединений проволоки с шинами электрической цепи. В КД не предусмотрено нормирования сварных соединений проволоки, при этом риск несанкционированного срабатывания из-за ненормированной прочности сварных соединений неоправданно высок по отношению к требованиям безотказности актуатора.

5. Для запирания ролика держателем используется фрикционно-силовой способ удержания, не предусматривающий силовую блокировку вибрационных перемещений. Риск несанкционированного срабатывания держателя вследствие вибрационных перемещений методом сравнения с аналогом – моделью самоотвинчивания гаек в резьбовых соединениях, оценивается как крайне высокий. Для количественной оценки вероятности отказов при несанкционированном срабатывании необходимо провести исследовательские вибрационные испытания держателя с неустановленным съёмным элементом.

6. Фрикционно-силовой способ удержания УС характеризуется крайней нестабильностью и неопределённостью моментов сил сопротивления при срабатывании, что в совокупности с существенным понижением момента движущих сил и ростом момента сил сопротивления к моменту освобождения держателя приводит к невыполнению требования по запасам движущего момента (не менее 200 %) как при действии одного, так и при одновременном действии четырёх штоков актуатора.

7. Запасы срабатывания держателя от пружины держателя не соответствуют заданным требованиям (не менее 200 % для наихудшего случая).

8. Конструкция УС не соответствует требованиям ОСТ 92-1615 и ГОСТ 19005 по защите электронных устройств от статического электричества.

9. Необходимо пересмотреть конструктивно-силовую и конструктивно-компоновочную схемы, а также конструкцию УС с учётом приведённых рекомендаций.

10. Необходимо провести дополнительный анализ на случай возникновения индукционных токов в электрических цепях актуатора УС при пересечении магнитосферы Земли для наихудших сочетаний факторов (углов пересечения магнитосферы, скорости движения, состояния радиационных поясов Земли и т. п.).

11. Требуется сделать корректировку расчёта на прочность Р14 в части введения расчётного случая нагружения проволоки от пружины актуатора, в том числе с учётом индуктивных наводок.

12. Необходима корректировка расчёта надёжности Р12 в части уточнения расчётов по запасам срабатывания УС.

6.2.9. Рекомендации по доработке конструкции устройства спускового

Основываясь на проведённых исследованиях и анализах, для выполнения заданных требований по безотказности (не менее 0,999 995) предлагаем перечень рекомендаций по доработке конструкции устройства спускового.

1. Установить в КД нормы прочности проволоки 0,2 Х20Н80-Н с учётом возможности возникновения индукционных токов в электрических цепях актуатора, а именно: требования к назначению коэффициентов безопасности, регламентированию монтажных усилий, определению нагрузок, расчётной проверке прочности, экспериментальной отработке прочности, контролю и подтверждению прочности на этапах экспериментальной отработки, летных испытаний и эксплуатации.

2. Установить в КД требования по проведению периодических испытаний на прочность сварных соединений проволоки 0,2 Х20Н80-Н в соответствии с рекомендациями ОСТ 92-1741.

3. Установить в КД требование по снятию съёмного элемента перед проведением вибрационных испытаний на синусоидальные и широкополосные случайные нагрузки.

4. Провести как минимум дополнительные исследовательские испытания держателя на синусоидальную и широкополосную случайную вибрацию с повышенным уровнем нагрузок и временем испытаний (например, не менее 125 % по уровню нагрузок и не менее 200 % по продолжительности проведения испытаний) в диапазоне частот 5–2 500 Гц, желательно, с видео- (фото-) контролем сопряжения ролика с шайбой штока. По результатам дополнительных вибрационных испытаний дать заключение о надёжности запирающего ролика штоком держателя.

5. Исключить требование по нанесению ВНИИ НП-212 на поверхность шайбы штока держателя в зоне контакта с роликом опорного узла кронштейна.

6. Установить угол наклона шайбы штока держателя больше угла трения смазки ВНИИ НП-212 при температуре минус 100 °С.

7. Установить допуск неперпендикулярности между плоскостью контакта ролика со стенкой корпуса держателя и отверстиями под ось вращения кронштейна держателя.

8. Установить в ТУ требования по демонтажу съёмного элемента при подготовке космического аппарата к пуску.

9. Принять меры по выполнению требований по запасу срабатывания УС и держателя (не менее 200 % для наихудшего случая).

10. Предусмотреть в КД меры по металлизации устройства спускового согласно требованиям ОСТ 92-1615 и ГОСТ 19005 по защите электронных устройств от статического электричества.

6.3. Пример конструкторско-технологического анализа надёжности мембраны заглушки

Заглушка является элементом конструкции цементировочной муфты, используемой в технологическом оборудовании нефтяных скважин, которая предназначена для герметизации внутренней полости оборудования при избыточных давлениях до 165 кгс/см² и полного разрушения при давлении 195_{-20}^{+30} кгс/см² для осуществления цементирования затрубного пространства.

Внешний вид и геометрические размеры заглушки приведены на рис. 6.10. Материал заглушки – бериллиевая бронза марки БрБ2 в составленном состоянии. Избыточное давление на мембрану заглушки подаётся в направлении А.

Очевидно, что критичный элемент заглушки – мембрана толщиной $s = 0,45$ мм, которая должна обладать двумя свойствами: сопротивляться разрушению при давлениях ниже 165 кгс/см² и разрушаться при давлении 195_{-20}^{+30} кгс/см². Подтвердить выполнимость данных свойств мембраны заглушки расчётными методами не представляется возможным из-за особенностей конструктивного исполнения заглушки. Во-первых, численные расчёты методом конечных элементов непригодны из-за наличия сингулярных (угловых) точек в местах сопряжения плоскостей мембраны с цилиндрическими выборками $\varnothing 18^{+0,08}$, $\varnothing 17,5^{+0,08}$ и $\varnothing 12,5_{-0,08}$ мм. Сходимость результатов таких расчётов при изменении сетки конечных элементов обеспечивается только при радиусах скруглений угловых точек, существенно искажающих контур мембраны и нарушающих нормальную работу заглушки. Во-вторых, поиск аналитических расчётных схем привёл

к единственной подходящей расчётной схеме кольцевой пластины с центральным диском, закреплённой по внешнему контуру [243]. Однако уровень прогибов при заданном давлении более чем в 20 раз превышает толщину мембраны, что не соответствует линейной теории упругости «жёстких» пластин [244].

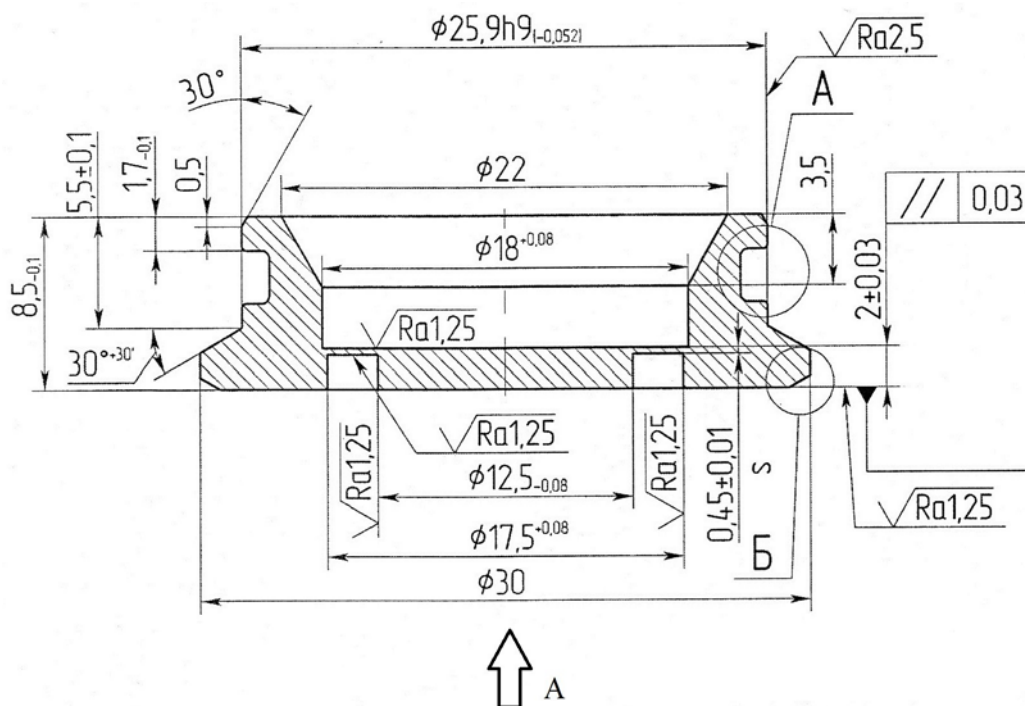


Рис. 6.10. Эскиз заглушки

Предполагается, что заданные свойства мембраны можно обеспечить, благодаря технологии изготовления заглушки путём подбора толщины мембраны $s = 0,45 \pm 0,01$ мм, исходя из результатов испытаний на механические характеристики свойств материала заготовки на образцах-свидетелях и гидростатических испытаний пробной заглушки. Для подтверждения выполнимости указанных свойств используются образцы и заглушки из числа одной партии деталей, изготовленных из одного прутка, которые надлежащим образом оформлены одним сопроводенным документом, хранятся в отдельной промаркированной таре и комплектуются на одно изделие.

Технология изготовления мембранной заглушки реализуется путём последовательного выполнения технологических операций, определённых в маршрутной карте:

- 1) изготовление двух образцов для проведения испытаний механических характеристик свойств материала;
- 2) проведение испытаний механических характеристик свойств материала для назначения фактического размера s ;

3) по результатам испытаний на механические характеристики свойств материала, изготовление двух заглушек для проведения испытаний на прочность до разрушения;

4) проведение испытания заглушки на герметичность с выдержкой в течение 5 мин при пробном давлении 170_{-2} кгс/см² (пробное давление при проверке герметичности мембраны задаётся на 5_{-2} кгс/см² выше максимально возможного давления при проведении подготовительных технологических операций перед началом цементирования затрубного пространства ствола скважины);

5) проведение испытания заглушки на герметичность с выдержкой в течение 5 мин при пробном давлении 170_{-2} кгс/см² и последующее разрушение заглушки при давлении 195_{-10}^{+20} кгс/см² с фиксацией величины разрушающего давления (диапазон давлений при испытаниях мембраны на прочность до разрушения задаётся на 10 кгс/см² выше минимально и на 10 кгс/см² ниже максимально допустимых разрушающих давлений при эксплуатации);

б) при несоответствии значения разрыва стенки мембраны давлению 195_{-10}^{+20} кгс/см² (исходя из фактического значения прочности на разрыв, действительного размера s и фактического значения давления разрушения мембраны) выбирают новое значение размера s с повторным проведением всех операций до выполнения условий разрушения мембраны;

7) при соответствии разрушающего давления заданному (195_{-10}^{+20} кгс/см²) изготавливается вся партия заглушек с той же толщиной стенки s , что и заглушка, прошедшая испытание на разрушение.

Технологию сборки и испытаний муфты в части работ, касающихся заглушки, проводят согласно программе и методике испытаний и маршрутной карте в строгой последовательности. Во-первых, собирают муфту согласно сборочному чертежу, во-вторых, испытания проводят согласно режимам, установленным в программе и методике, в-третьих, детали, пришедшие в негодность, заменяют, а муфту собирают согласно сборочному чертежу, в-четвёртых, муфту испытывают на герметичность в течение 2 мин при пробном давлении 170_{-2} кгс/см².

В результате проведения конструкторско-технологического анализа надёжности были сделаны такие выводы:

- в КД установлены недостаточные требования к изготовлению заглушки;
- выявлены грубые несоответствия требований конструкторской и технологической документации;
- недостаточно методов контроля параметров изготовления заглушки;

- на предприятии отсутствуют надлежащие коммуникации между конструкторами и технологами;
- в технологическом процессе не содержится указаний на технический документ, в котором описан метод выбора толщины стенки мембраны, надлежащим образом согласованный с конструктором-разработчиком муфты;
- в программах и методиках испытаний, а также и маршрутной технологической карте не указан метод контроля негерметичности.

В процессе проведения КТАН была выполнена экспертиза методики по подбору толщины стенки мембраны. Приведём её результаты.

1) При несоответствии значения давления разрыва стенки мембраны заданному давлению в диапазоне 195_{-10}^{+20} кгс/см² назначение размера s производится технологом без учёта результатов испытаний механических свойств материала заглушки директивным уменьшением (увеличением) фактической толщины мембраны с шагом 0,02 мм вплоть до достижения заданного значения давления разрушения.

2) При подборе толщины стенки мембраны s отсутствуют какие-либо ограничения в КД по выбору её фактической толщины, которая по выявленным в ходе экспертизы прецедентам может быть существенно ниже или выше толщины мембраны, заданной в чертеже (например, фактическая толщина мембраны может оказаться 0,37 мм, что было выявлено в результате контрольных измерений фактической толщины мембраны).

Опасность заключается в том, что бесконтрольное снижение толщины стенки мембраны (когда в расчёт не принимаются результаты испытаний механических свойств материала заглушки) может привести к возникновению недопустимых пластических деформаций, которые накапливаются и с каждым последующим нагружением снижают несущую способность мембраны. В частности, после проведения заводских испытаний на герметичность и технологических операций по подготовке оборудования в скважине, снижение несущей способности может достигнуть такого значения, когда открытие цементировочных окон произойдет при давлении, ниже ожидаемого (170_{-2} кгс/см²). В некоторых случаях не исключена вероятность открытия цементировочных окон в процессе проведения технологических операций перед началом цементирования затрубного пространства ствола скважины при давлениях ниже 165 кгс/см².

Это возможно на основании следующих причин. При испытаниях мембраны до разрушения допустимые давления могут меняться от 185 до 215 кгс/см² (увеличение на 16 %). При эксплуатации муфты допустимые давления могут меняться от 175 до 225 кгс/см² (увеличение на 28,6 %). Переход в пластическое состояние бериллиевой бронзы марки БрБ2 в составленном состоянии возможен при действующих напряжениях в диапазоне от

предела текучести $\sigma_T = 1\,000$ МПа до предела прочности $\sigma_B = 1\,250$ МПа (увеличение на 25 %) [245]. Фактически при указанных выше диапазонах изменения давлений существует большая вероятность того, что при назначенной технологом толщине стенки мембраны в ходе заводских испытаний на герметичность в мембране будут возникать пластические деформации.

При уменьшении толщины стенки мембраны действующие напряжения возрастают обратно пропорционально квадрату толщины мембраны. Для фактически реализуемой в конструкции расчётной схемы мембраны максимальные напряжения определяются зависимостью [243]

$$\sigma_{\text{макс}} = 6M_r / \delta^2,$$

где M_r – интенсивность радиальных изгибающих моментов на единицу длины цилиндрического сечения пластины; δ – толщина пластины.

Таким образом, например, уменьшение толщины стенки мембраны с 0,45 до 0,37 мм (уменьшение на 21 %) приведёт к увеличению действующих напряжений на 48 %, что способно вызвать возникновение существенных пластических деформаций в мембране при давлениях ниже 170_{-2} кгс/см² (ниже давления проверки на герметичность).

3) В ходе проведения экспертизы выяснилось следующее: технологи заметили, что результаты испытаний по разрушению первой (пробной) и второй (из товарной партии) заглушки существенно отличаются по значению величины давления разрыва стенки мембраны, причём давление разрушения первой заглушки выше, чем давление разрушения второй детали. Исходя из этого (без согласования с конструкторами), технологи приняли решение о назначении размера s по результатам изготовления двух первых деталей.

4) Также в ходе проведения экспертизы было выявлено, что результаты испытаний на разрушение заглушки существенно зависят от количества деталей в партии, изготовленной одной фрезой для обработки толщины стенки мембраны s . Вследствие износа концевой фрезы давление разрыва стенки каждой последующей мембраны увеличивается. На основании этого наблюдения было ограничено количество деталей в обрабатываемой партии до 30 шт. без учёта пробных деталей, изготавливаемых для проведения испытаний до разрушения при подборе окончательной толщины мембраны. Стойкость фрезы была эмпирически оценена как достаточная для изготовления партии деталей в пределах 37–38 шт. с учётом пробных деталей.

5) При изготовлении мембраны в технологическом приспособлении была принята технологическая база, не соответствующая базе, заданной в КД. В результате при закреплении и фрезеровании толщины мембраны s возможно искажение формы поверхности мембраны из-за упругих деформаций и остаточных напряжений.

На основании проведённой экспертизы методом КТАН были даны такие рекомендации:

а) обобщить, систематизировать и проанализировать статистические данные результатов испытаний на механические характеристики свойств материала заготовки на образцах-свидетелях и гидростатических испытаний пробной заглушки, а также обосновать:

- алгоритм и метод выбора толщины стенки мембраны,
- режимы резания первых (пробных) образцов и последующих деталей в партии,
- допустимое количество деталей в партии, обрабатываемых одной фрезой,
- объём и порядок проведения контрольных (доводочных, приёмосдаточных, периодических) испытаний деталей в партии;

б) разработать методику подбора толщины стенки мембраны и установить в КД необходимые и достаточные требования к изготовлению заглушки;

в) задать в чертеже на изготовление заглушки допуски формы стенок мембраны согласно рис. 6.11.

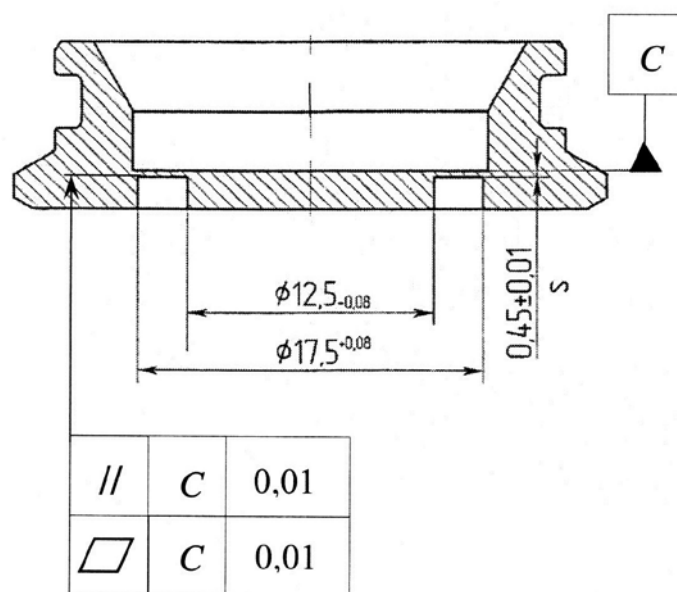


Рис. 6.11. Эскиз заглушки с рекомендациями по корректировке чертежа

Ужесточение требований по допускам формы стенок мембраны (на чертеже) приведёт к необходимости либо регламентировать усилие поджатия заглушки при фрезеровании в технологическом приспособлении, либо к переходу на технологию точения заглушки в оправке, т. е. снижению рисков недопустимого локального утонения стенок;

г) рассмотреть возможность изменения конструкции заглушки путём переноса внешней стенки кольцевой канавки с диаметра 17,5 до 22,5 мм без изменения внутреннего диаметра, равного 12,5 мм. Это позволит уйти от краевых эффектов заделки стенок мембраны и тем самым повысить стабильность разрушающего давления.

6.4. Пример использования конструкторского анализа надёжности штанги рефлектора в рабочем положении

В п. 2.2 упоминалось о том, что до настоящего времени ещё не разработаны методики анализа (расчёта) надёжности раскрытых конструкций в рабочем положении к концу САС. Однако принципы и подходы, применяемые при проведении конструкторско-технологического анализа надёжности, позволяют решить эту задачу.

На примере решения задачи анализа надёжности штанги рефлектора [246], приведённой на рис. 6.12, опишем **общие положения для проведения конструкторского анализа надёжности в рабочем положении**. Штанга рефлектора представляет собой стержневую конструкцию, которая раскладывается из сложенного положения в рабочее (рис. 6.13). После завершения раскрытия штанга рефлектора должна функционировать в рабочем положении, обеспечивая «проявление объектом заданных свойств», в течение 15 лет в условиях факторов космического пространства с ВБР не менее 0,995.



Рис. 6.12. Принципиальная схема КА с крупногабаритным рефлектором в рабочем положении

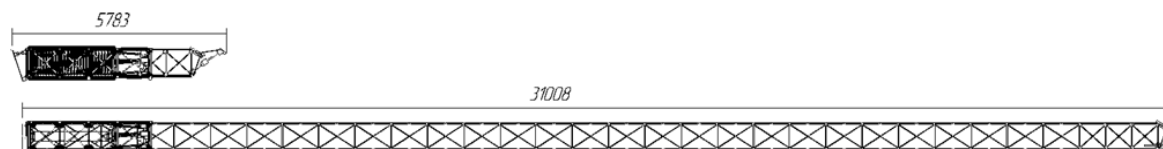


Рис. 6.13. Штанга рефлектора в сложенном и в рабочем положениях

Сама по себе постановка задачи надёжности раскрытых в рабочее положение конструкций, заключающаяся в выполнении разноплановых физических свойств с заданным обобщённым показателем безотказности, в научно-технической литературе серьёзно не обсуждалась, не говоря уже о каких-либо практических методах её решения. На практике используется набор разрозненных методик по определению отдельных параметров РК в рабочем положении (например, нижней частоты собственных колебаний, точности позиционирования прецизионных поверхностей, положения центров масс конструкции в раскрытом положении, вследствие тепловых деформаций, прочности конструкций и т. п.).

Поскольку основополагающими при использовании КТАН будут понятия «функционирование» и «свойство», разберём их применительно к штанге рефлектора. Очевидно, что в рабочем положении, когда завершены процессы раскрытия, функционирование понимается как *«проявление объектом заданных свойств»* [103].

В общем случае в раскрытом положении штанга рефлектора может иметь такие свойства:

- позиционирование (занятие предписанных пространственных положений конструктивных элементов в процессе перемещения и установки изделия в конечное положение);
- точность (соответствие близости между наблюдаемыми и базовыми значениями параметров, например параметров позиционирования);
- прецизионность (неизменность пространственных положений элементов конструкций в условиях воздействия механических вибраций и термоциклирования на орбите);
- устойчивость (недопустимость бифуркаций под действием нагрузок на орбите, например, из-за люфтов в соединениях или вероятности несанкционированного складывания конструкций);
- деформативность (допустимость пределов перемещений элементов конструкций при деформациях под воздействием внешних механических нагрузок и тепловых воздействий);
- прочность (обеспечение способности конструкции сопротивляться заданным нагрузкам на орбите);
- сохранность (обеспечение целостности и отсутствия повреждений конструктивных элементов в течение времени, например клееных соеди-

нений в условиях длительного нестационарного воздействия электромагнитного, радиационного и теплового излучений);

- жёсткость (обеспечение заданных удельных характеристик жёсткости конструкции на изгиб, кручение, сжатие, растяжение и/или сдвиг либо заданного уровня парциальных частот собственных колебаний с учётом эффектов старения материалов, например, разрушений, деформаций, изменения характеристик материала, сублимации, эрозии, износа и т. п.).

Исходя из идеи осуществления **метода фиктивных элементов** [14], будем считать недопустимым отказом не проявление любого из свойств штанги рефлектора в рабочем положении. В этом случае реальная штанга рефлектора заменяется моделью из n -фиктивных элементов, каждый из которых может находиться только в одном из предельных состояний по позиционированию, точности, прецизионности, прочности, жесткости, устойчивости и т. д. Предельные состояния по каждому из свойств устанавливаются в ТЗ на разработку в виде допустимых значений параметров, например угловых или линейных смещений характерных точек конструкции (центров масс, интерфейсов сопряжения приборов, оборудования или конструкций и пр.), удельных жесткостей конструкции, запасов прочности, нижних частот собственных колебаний, люфтов в шарнирных соединениях и т. п. Все заданные в ТЗ требования по функционированию штанги рефлектора в рабочем положении считаются критичными по определению. Отказом выполнения свойств штанги рефлектора в рабочем положении является переход через предельное (допустимое) состояние в запредельное (недопустимое) по каждой из заданных функций в соответствие с формулой (2.5).

Для элементов, независимых в смысле надёжности, на которые действует одна нагрузка или одно воздействие, применяют **модель цепи** [15]. При этом последовательно соединенные элементы заменяются одним приведённым элементом, критическая способность которого минимальна по сравнению с критической способностью рассматриваемых элементов, т. е.

$$R_{\min} = \min (R_1, R_2, \dots, R_n), \quad (6.20)$$

где R_{\min} , R_1 , R_2 , R_n – случайные величины.

По результатам проведения всех анализов, на основании (6.20), общая надёжность штанги рефлектора в рабочем положении в течение САС определяется минимальной надёжностью любого из фиктивных элементов (свойств). При этом в рамках проявления любого из свойств (внутри фиктивного элемента), исходя из иерархической структуры свойств качества (см. рис. 4.3), применяется метод структурной схемы надёжности.

В ТЗ на разработку штанги рефлектора были предъявлены требования по точности углового разворота относительно осей местной системы координат штанги и линейного смещения относительно продольной оси,

а также по удельной изгибной и крутильной жёсткости штанги на конец САС. Таким образом, на основании требований технического задания надёжность штанги должна быть оценена исходя из проявления заданных свойств точности и жёсткости по заданным предельным состояниям.

6.4.1. Конструкторский анализ надёжности штанги рефлектора в рабочем положении

Поскольку ТД на штангу рефлектора к моменту проведения КТАН не разработана, то выполнялась только конструкторская часть анализов.

Конструкторский анализ надёжности штанги рефлектора в рабочем положении проводят исходя из следующих предположений: если сделана декомпозиция каждого из заданных свойств штанги рефлектора в рабочем положении по составляющим свойствам низшего уровня иерархии, выполнение которых надлежащим образом определено и регламентировано в КД в соответствие с процедурами конструкторско-технологического анализа надёжности, а значение заданных в ТЗ параметров, характеризующих требуемые свойства, достигнуто, то заданная надёжность обеспечена. Невыполнение тех или иных процедур КТАН должно быть оценено, например, методом балльных оценок по формуле (6.18).

Общие принципы и алгоритмы проведения конструкторско-технологического анализа надёжности штанги рефлектора в рабочем положении полностью соответствуют методике, изложенной в главе 5 и использованной при конструкторском анализе надёжности УС (п. 6.1).

Результаты конструкторского анализа надёжности штанги рефлектора в рабочем положении приведены в табл. 6.5 и 6.6.

Проведём анализ выполнимости свойств критичных элементов штанги рефлектора, которые приведены в табл. 6.5.

Свойство регулировочных элементов штанги рефлектора обеспечивать максимальную точность позиционирования в рабочем положении. Точность позиционирования штанги рефлектора относительно расположения базовых поверхностей в рабочем положении обеспечивается введением в конструкцию штанги элементов, регулировка которых производится при её юстировке в рабочем положении. Программа и методика проведения юстировки штанги рефлектора в КД **не приведена.**

Заданный угол между базовыми поверхностями в рабочем положении штанги рефлектора выставляется с помощью регулировочных прокладок в её корневых узлах. Заданная длина штанги рефлектора обеспечивается с помощью подрезки в требуемый размер стержней, формирующих не трансформируемый каркас концевой секции. Требования по проведению регулировки заданной длины в КД **отсутствуют.**

Таблица 6.5

Свойства критичных элементов, обеспечивающие безотказность штанги рефлектора в рабочем положении

Отказы штанги рефлектора	Условия возникновения отказов штанги рефлектора	Причины отказов штанги рефлектора	Свойства, обеспечивающие безотказность штанги рефлектора	Показатели или параметры, характеризующие свойства, обеспечивающие безотказность штанги рефлектора
Угловые развороты и линейные смещения больше заданных значений в ТЗ	Производственные факторы	Погрешности изготовления, сборки и настройки штанги рефлектора	Свойство регулировочных элементов штанги рефлектора обеспечивать максимальную точность позиционирования в рабочем положении	Угловой разворот и линейное смещение штанги рефлектора вследствие погрешностей регулировок
		Погрешности обезвешивания штанги рефлектора	Свойство устройств системы обезвешивания обеспечивать максимальную компенсацию весовых деформаций штанги рефлектора	Угловой разворот и линейное смещение штанги рефлектора вследствие погрешностей обезвешивания
		Погрешности средств и методов измерения	Свойство средств и методов измерения обеспечивать максимальную точность измерений	Угловой разворот и линейное смещение штанги рефлектора вследствие погрешностей средств и методов измерения
		Погрешности изготовления углепластиковых трубок	Свойство углепластиковых трубок сохранять геометрическую стабильность после изготовления	Угловой разворот штанги рефлектора вследствие релаксации напряжений при кольцевом обжатии трубок
	Повторяющиеся локальные нагрузки и контактные напряжения, возникающие при повторных раскрытиях	Деформации смятия контактных поверхностей деталей	Свойство контактных поверхностей деталей в узлах центральных противостоять смятию	Угловой разворот и линейное смещение штанги рефлектора из-за смятия контактных поверхностей деталей в узлах центральных

	Нагрузки при наземной транспортировке и в полёте	Остаточные деформации	Свойство конструктивных элементов штанги рефлектора удовлетворять условиям прочности по пределу текучести	Угловой разворот и линейное смещение штанги рефлектора из-за остаточных деформаций в результате нагрузок при наземной транспортировке и в полёте
	Эксплуатационные нагрузки на орбите	Люфты в рабочем положении механизмов раскрытия штанги рефлектора	Свойство шарнирных соединений штанги рефлектора обеспечивать безлюфтовость	Угловой разворот и линейное смещение штанги рефлектора из-за наличия люфтов
	Вибрации орбитального участка и термоциклирование	Изменение позиционирования соединяемых деталей в кинематических парах трения	Свойство кинематических пар обеспечивать стабильность позиционирования при вибрациях или термоциклировании	Угловой разворот и линейное смещение штанги рефлектора вследствие вибраций орбитального участка или термоциклирования
	Длительное пребывание в условиях ФКП и воздействия эксплуатационных нагрузок на орбите	Изменения физико-механических характеристик клея в течение САС	Свойство клея сохранять неподвижность соединения при эксплуатационных нагрузках на орбите в течение САС	Угловой разворот и линейное смещение штанги рефлектора из-за нарушения неподвижности клееных соединений
		Изменения физико-механических свойств композиционных материалов вследствие старения и десорбции влаги	Свойство композиционных материалов сохранять стабильность при длительном пребывании в условиях ФКП	Угловой разворот и линейное смещение штанги рефлектора вследствие старения и десорбции влаги
	Тепловое воздействие	Тепловые деформации	Свойство элементов конструкции обеспечивать минимальную тепловую деформацию	Угловой разворот и линейное смещение штанги рефлектора вследствие воздействия тепловых полей

Отказы штанги рефлектора	Условия возникновения отказов штанги рефлектора	Причины отказов штанги рефлектора	Свойства, обеспечивающие безотказность штанги рефлектора	Показатели или параметры, характеризующие свойства, обеспечивающие безотказность штанги рефлектора
Изгибная жесткость и крутильная жесткость сечения штанги рефлектора менее заданных значений в ТЗ	Конструктивные факторы	Невыполнение требований по изгибной и крутильной жесткостям сечения штанги рефлектора	Свойство элементов конструкции обеспечивать минимальную жёсткость сечения штанги рефлектора	Допустимая изгибная и крутильная жесткость сечения штанги рефлектора
	Производственные факторы	Разброс технологических параметров изготовления углепластиковых трубок	Свойство углепластиковых трубок сохранять стабильность характеристик в процессе изготовления	Допустимое изменение изгибной и крутильной жесткости вследствие стабильности характеристик в процессе изготовления
	Длительное пребывание в условиях ФКП и воздействия эксплуатационных нагрузок на орбите	Изменения физико-механических свойств композиционных материалов вследствие старения и десорбции влаги	Свойство композиционных материалов сохранять стабильность при длительном пребывании в условиях ФКП	Допустимое изменение изгибной и крутильной жесткости вследствие длительного пребывания в условиях ФКП

Таблица 6.6

Установление предельных границ изменения значений показателей и параметров штанги рефлексора

Показатели или параметры, характеризующие свойства, которые обеспечивают безотказность штанги	Значения показателей и параметров, при которых обеспечивается работоспособность штанги	Критерии установления предельных значений показателей и параметров	Обоснование критериев	Документ, в котором приводится обоснование или подтверждение выполнения критериев	Состояние требований в КД по исполнению заданных значений показателей и параметров	Выводы
Угловой разворот и линейное смещение штанги рефлексора вследствие погрешностей регулировок	Угловой разворот относительно осей местной системы координат и линейные смещения относительно продольной оси более заданных значений в ТЗ	Дискретность угловой и линейной регулировки не более 0,5 мм	Расчёт погрешностей юстировки штанги	Р21	Требования по местам установки пригоночных прокладок; требования по пригонке линейного размера штанги отсутствуют; схема юстировки штанги не приведена	Требования в полной мере не установлены
Угловой разворот и линейное смещение штанги рефлексора вследствие погрешностей обезвешивания		Порядок раскрытия и обезвешивания штанги производится согласно ТУ	Расчёт погрешностей обезвешивания штанги методом конечных элементов	Р21	Требования установлены в полной мере в ТУ	
Угловой разворот и линейное смещение штанги рефлексора вследствие погрешностей средств и методов измерения		Критерии не установлены	Обоснование критериев не произведено		Требования в КД не установлены	

Продолжение табл. 6.6

Показатели или параметры, характеризующие свойства, которые обеспечивают безотказность штанги	Значения показателей и параметров, при которых обеспечивается работоспособность штанги	Критерии установления предельных значений показателей и параметров	Обоснование критериев	Документ, в котором приводится обоснование или подтверждение выполнения критериев	Состояние требований в КД по исполнению заданных значений показателей и параметров	Выводы
Угловой разворот штанги рефлектора вследствие релаксации напряжений при кольцевом обжатии трубок		Критерии не установлены	Обоснование критериев не произведено		Требования в КД не установлены	
Угловой разворот и линейное смещение штанги рефлектора из-за смятия контактных поверхностей деталей в узлах центральных	Угловой разворот относительно осей местной системы координат и линейные смещения относительно продольной оси	Критерии не установлены	Обоснование критериев не произведено		Требования в КД не установлены	
Угловой разворот и линейное смещение штанги рефлектора из-за остаточных деформаций в результате нагрузок при наземной транспортировке и в полёте	относительно продольной оси больше заданных значений в ТЗ	Отсутствие разрушений и остаточных деформаций элементов конструкций при эксплуатации	Расчёты на прочность	Р14	Требования в КД установлены в полной мере	

Угловой разворот и линейное смещение штанги рефлектора из-за наличия люфтов		Требование ТЗ о недопустимости люфтов в рабочем положении			Требования в КД, обеспечивающие отсутствие люфтов в рабочем положении, не установлены
Угловой разворот и линейное смещение штанги рефлектора вследствие вибраций орбитального участка или термоциклирования		Наличие угла трения в кинематических парах	Расчёт погрешностей от вибрации при ориентации и стабилизации	P21	Требования в КД установлены в полной мере
Угловой разворот и линейное смещение штанги рефлектора из-за нарушения неподвижности клееных соединений	Угловой разворот относительно осей местной системы координат и линейные смещения относительно продольной оси больше заданных значений в ТЗ	Критерии не установлены	Обоснование критериев не произведено		Требования в КД не установлены
Угловой разворот и линейное смещение штанги рефлектора вследствие старения и десорбции влаги		Результаты исследований материалов	Оценка погрешностей от старения и десорбции влаги	P21	Требования в КД установлены в полной мере
Угловой разворот и линейное смещение штанги рефлектора вследствие воздействия тепловых полей		Тепловые расчёты для худшего случая теплового нагружения	P17	P21	Требования в КД установлены в полной мере

Показатели или параметры, характеризующие свойства, которые обеспечивают безотказность штанги	Значения показателей и параметров, при которых обеспечивается работоспособность штанги	Критерии установления предельных значений показателей и параметров	Обоснование критериев	Документ, в котором приводится обоснование или подтверждение выполнения критериев	Состояние требований в КД по исполнению заданных значений показателей и параметров	Выводы
Допустимая изгибная и крутильная жесткость сечения штанги рефлектора	Изгибная жесткость и крутильная жесткость сечения штанги рефлектора менее заданных значений в ТЗ	Требование по жесткости установлено в ТЗ		Р14	Требования в КД установлены в полной мере	
Допустимое изменение изгибной и крутильной жесткости вследствие стабильности характеристик в процессе изготовления		Критерии не установлены	Обоснование критериев не произведено		Требования в КД не установлены	
Допустимое изменение изгибной и крутильной жесткости вследствие длительного пребывания в условиях ФКП		Результаты исследований материалов	Оценка погрешностей от старения и десорбции влаги	Р21	Требования в КД установлены в полной мере	

Погрешности регулировок при юстировке штанги определены в расчётах показателей точности P21 [218] исходя из предположения, что дискретность регулировок не превысит 0,5 мм.

Свойство устройств системы обезвешивания обеспечивать максимальную компенсацию весовых деформаций штанги рефлектора. Юстировка штанги рефлектора производится в условиях земной гравитации в обезвешенном состоянии, соответственно на точность штанги в условиях невесомости будут влиять некомпенсированные весовые деформации при обезвешивании.

Погрешности от некомпенсированных весовых деформаций определены в расчётах показателей точности P21.

Свойство средств и методов измерения обеспечивать максимальную точность измерений. На точность штанги рефлектора в условиях невесомости влияет точность измерительных средств и методики проведения измерений при её юстировке и в рабочем положении на Земле.

Погрешности, вызванные средствами и методами измерений в расчётах показателей точности P21, не определены.

Свойство углепластиковых трубок сохранять геометрическую стабильность после изготовления. Трубки стержневой конструкции штанги рефлектора изготавливают из КМУ-М46J/5 на намоточном станке методом мокрой намотки препрега ПУ-М46J/5 в соответствии с требованиями ТУ изготовителя.

Согласно техническим условиям в требованиях чертежа на изготовление трубок должны быть заданы: температура, давление и способ формовки, а также физико-механические характеристики композиционного материала. Из перечисленных характеристик в технических требованиях чертежа указано только то, что усилие натяжения (давление) жгута при намотке обеспечивается программой намотки (т. е. давление при формовке фактически не контролируется).

При намотке реализуется схема армирования: $(1/8^\circ + 1/-8^\circ + 1/90^\circ) \times 4 + 1/90^\circ$. Неконтролируемое давление при формовке угольных волокон приводит к неизвестным значениям внутренних сжимающих напряжений в кольцевых слоях углепластика, которые в результате релаксации в процессе эксплуатации штанги рефлектора в рабочем положении могут привести к неопределённой закрутке трубок и в конечном счёте её угловому развороту.

Расчёт показателей точности P21 не содержит оценки величины погрешностей от геометрической нестабильности в результате намотки углепластиковых трубок.

Свойство контактных поверхностей деталей в узлах центральных противостоять смятию. В расчётах показателей точности P21 не со-

держится оценки погрешностей вследствие возможного смятия контактных поверхностей деталей штанги.

Свойство конструктивных элементов штанги рефлектора удовлетворять условиям прочности по пределу текучести. Возможность возникновения остаточных деформаций в элементах конструкции штанги рефлектора в сложенном положении и при развёртывании исключаются на основании расчётов на прочность Р14.

Свойство шарнирных соединений штанги рефлектора обеспечивать безлюфтовость. Расчёты показателей точности Р21 проводят, предполагая, что в конструкции штанги рефлектора предусмотрен выбор зазоров в шарнирах продольно расположенных стержней. При этом в КД на штангу рефлектора требований по регулировке люфтов **не предусмотрено.**

Критичность люфтов в шарнирах штанги для системы управления КА определяется их значениями, величиной внешней эксплуатационной нагрузки и логарифмическим декрементом колебаний, что влияет на эффективность управления аппаратом на орбите, в то же время точность позиционирования штанги люфты определяют напрямую.

Свойство кинематических пар обеспечивать стабильность позиционирования при вибрациях или термоциклировании. Уменьшение трения в кинематических парах при вибрациях и термоциклировании приводит к изменению положения осей в зазорах шарниров, вследствие чего изменяется позиционирование штанги рефлектора.

Погрешности от уменьшения трения в кинематических парах при вибрациях орбитального участка определены в расчётах показателей точности Р21.

Свойство клея сохранять неподвижность соединения при эксплуатационных нагрузках на орбите в течение срока активного существования. При длительной работе конструкций в условиях ФКП клей ВК-9, как правило, применяют в ненагруженных соединениях, поскольку ресурс работы клееных соединений при температуре плюс 125 °С составляет 500 ч (ОСТ 92-948, п. 1.2, табл. 1 [210]). При этом срок сохраняемости свойств клееных соединений (согласно п. 1.10 ОСТ 92-949 [247]) должен устанавливаться в КД по результатам ускоренных испытаний. Таким образом, выбор клея ВК-9 и отсутствие требований по ускоренным испытаниям не гарантирует того, что клееные соединения при эксплуатационных нагрузках в течение САС не разрушатся.

В расчётах показателей точности Р21 **не содержится** оценок погрешностей штанги вследствие возможных разрушений клееных соединений.

Свойство композиционных материалов сохранять стабильность при длительном пребывании в условиях факторов космического про-

странства. Оценка стабильности композиционных материалов при длительном пребывании в условиях ФКП за счёт старения и десорбции влаги произведена в расчёте показателей точности P21.

Свойство элементов конструкции обеспечивать минимальную тепловую деформацию. Погрешности от тепловых деформаций определены в расчётах показателей точности P21.

Свойство элементов конструкции обеспечивать минимальную жёсткость сечения штанги рефлектора. Выполнимость свойства подтверждена расчётами штанги на жёсткость в рабочем положении P14.

Свойство углепластиковых трубок сохранять стабильность характеристик в процессе изготовления. На механические характеристики изделий из углепластика влияют:

1) массовая доля связующего, которая согласно техническим условиям на изготовление углепластика может находиться в диапазоне от 32 до 42 % (справочные данные на механические характеристик углепластика, как правило, приводятся для значения массовой доли связующего 40 %);

2) допуск на углы укладки волокон, которые ни в КД на штангу рефлектора, ни в НТД не регламентируются;

3) разбросы по усилию натяжения (давление) жгута при намотке, которые также ничем не регламентируются в КД на штангу рефлектора.

Выполнимость данного свойства **требует проведения дополнительных исследований** или как минимум подтверждения стабильности значений модуля упругости на образцах-свидетелях при изготовлении трубок.

Свойство композиционных материалов сохранять стабильность при длительном пребывании в условиях факторов космического пространства. Оценка стабильности композиционных материалов при длительном пребывании в условиях ФКП за счёт старения и десорбции влаги произведена в расчёте показателей точности P21.

6.4.2. Вариант оценки надёжности штанги рефлектора в рабочем положении

По результатам поведения КТАН установлено, что заданная точность штанги рефлектора в рабочем положении обеспечивается за счёт проявления одиннадцати свойств КЭ, а заданная жёсткость – трёх свойств. Оценка параметров свойств точности произведена в расчётах показателей точности P21, где учтены шесть из одиннадцати свойств КЭ, выявленных в результате проведения КТАН. При этом оценка параметров точности не во всех случаях подтверждается установлением соответствующих требований в КД, например оценка погрешностей регулировок

проведена на основании предположения, что дискретность регулировок не превысит 0,5 мм.

Для пяти свойств КЭ критерии параметров не определены, не обоснованы, а требования в КД не установлены. Оценка погрешностей, вызванных люфтами, не производилась.

Для оценки надёжности штанги рефлектора по выполнению заданной точности используется структурная схема, представляющая собой блок-схему с последовательным соединением элементов в виде событий, заключающихся в проявлении заданных свойств КЭ. Оценка надёжности по точности производилась по одиннадцати событиям следующим образом: условимся считать, что если бы в процессе эксплуатации были реализованы допустимые значения и допуски показателей и параметров точности (шесть из которых не подтверждены расчётами), то ожидаемая вероятность каждого из событий, связанных с проявлением заданных свойств КЭ, была бы равна $P_i(t) \approx 1,0$. При неустановлении или ненадлежащем установлении соответствующих требований в КД их вероятность учитывается с помощью корректирующих коэффициентов p_i (5.15).

Исходя из того, что технологическая часть анализа КТАН не проводится, оценка надёжности штанги рефлектора по точности производится по верхнему уровню значений ВБР (5.2). Результаты оценки вероятности отказов КЭ и соответствующие им значения вероятности безотказной работы приведены в табл. 6.7. С учётом сказанного, а также (6.18) и данных табл. 6.7, надёжность по точности равна

$$P_T(C) \leq \prod_{i=1}^{11} P(C_{1,i}) = 0,871. \quad (6.21)$$

Оценка выполнения заданных требований жёсткости штанги рефлектора в рабочем положении производилась в расчётах Р14. В результате конструкторского анализа надёжности выявлено, что, помимо свойства конструкции обеспечивать минимальную жёсткость сечения штанги, необходимо учитывать проявление свойств углепластиковых трубок сохранять стабильность характеристик в процессе изготовления, а также свойств композиционных материалов сохранять стабильность при длительном пребывании в условиях ФКП. Для углепластиковых трубок свойство сохранять стабильность характеристик в процессе изготовления не определено, критерии не выбраны, обоснование не произведено, а требования в КД не установлены. Для композиционных материалов свойство сохранять стабильность при длительном пребывании в условиях ФКП подтверждено расчётами показателей на точность Р21.

Результаты оценки вероятности отказов КЭ и соответствующие им значения ВБР приведены в табл. 6.8.

Таблица 6.7

Оценка вероятностей отказов и соответствующих им значений ВБР при выполнении заданной точности штанги в рабочем положении

Свойства, обеспечивающие безотказность штанги в рабочем положении согласно табл. 6.5	Событие	Виды отказов по вероятности возникновения за время эксплуатации	Ожидаемая вероятность отказов	ВБР	Экспертная оценка ВБР $P(C_i)$	Примечание
Свойство регулировочных элементов штанги рефлектора обеспечивать максимальную точность позиционирования в рабочем положении	$C_{1.1}$	Отказ имеет малую вероятность, обусловленную только точностью расчёта	От 0,001 до 0,005	От 0,995 до 0,999	0,999	Экспертная оценка приведена с учётом анализов, приведенных на с. 275
Свойство устройств системы обезвешивания обеспечивать максимальную компенсацию весовых деформаций штанги рефлектора	$C_{1.2}$	Отказ маловероятен	От 0,000 05 до 0,001	От 0,999 до 0,999 95	0,999 95	Экспертная оценка приведена с учётом результатов расчётов P21
Свойство средств и методов измерения обеспечивать максимальную точность измерений	$C_{1.3}$	Отказы вполне вероятны	От 0,005 до 0,01	От 0,99 до 0,995	0,995	Экспертная оценка приведена с учётом анализов, приведенных на с. 283
Свойство углепластиковых трубок сохранять геометрическую стабильность после изготовления	$C_{1.4}$	Отказы вполне вероятны	От 0,005 до 0,01	От 0,99 до 0,995	0,995	Экспертная оценка приведена с учётом анализов, приведенных на с. 283
Свойство контактных поверхностей деталей в узлах центральных противостоять смятию	$C_{1.5}$	Отказы вполне вероятны	От 0,005 до 0,01	От 0,99 до 0,995	0,995	Экспертная оценка приведена с учётом анализов, приведенных на с. 283
Свойство конструктивных элементов штанги удовлетворять условиям прочности по текучести	$C_{1.6}$	Вероятность отказа ничтожна мала	≈ 0	≈ 1	≈ 1	Экспертная оценка приведена с учётом результатов расчётов P14

Окончание табл. 6.7

Свойства, обеспечивающие безотказность штанги в рабочем положении согласно табл. 6.5	Событие	Виды отказов по вероятности возникновения за время эксплуатации	Ожидаемая вероятность отказов	ВБР	Экспертная оценка ВБР $P(C_i)$	Примечание
Свойство шарнирных соединений штанги рефлектора обеспечить безлюфтовость	$C_{1.7}$	Вероятны повторные отказы	Более 0,11	Менее 0,89	0,89	Экспертная оценка приведена с учётом анализов, приведенных на с. 284
Свойство кинематических пар обеспечивать стабильность позиционирования при вибрациях или термоциклировании	$C_{1.8}$	Отказ практически невероятен	Менее 0,000 05	Более 0,999 95	0,999 95	Экспертная оценка приведена с учётом результатов расчётов P21
Свойство клея сохранять неподвижность соединения при эксплуатационных нагрузках на орбите в течение САС	$C_{1.9}$	Отказы вполне вероятны	От 0,005 до 0,01	От 0,99 до 0,995	0,995	Экспертная оценка приведена с учётом анализов, приведенных на с. 284
Свойство композиционных материалов сохранять стабильность при длительном пребывании в условиях ФКП	$C_{1.10}$	Отказ практически невероятен	Менее 0,000 05	Более 0,999 95	0,999 95	Экспертная оценка приведена с учётом результатов расчётов P21
Свойство элементов конструкции обеспечивать минимальную тепловую деформацию	$C_{1.11}$	Отказ практически невероятен	Менее 0,000 05	Более 0,999 95	0,999 95	Экспертная оценка приведена с учётом результатов расчётов P21

Таблица 6.8

Оценка вероятностей отказов и соответствующих им значений ВБР
при выполнении заданной жёсткости штанги в рабочем положении

Свойства, обеспечивающие безотказность штанги рефлектора в рабочем положении согласно табл. 6.5	Событие	Виды отказов по вероятности возникновения за время эксплуатации	Ожидаемая вероятность отказов	ВБР	Экспертная оценка ВБР $P(C_i)$	Примечание
Свойство элементов конструкции обеспечивать минимальную жёсткость сечения штанги рефлектора	$C_{2.1}$	Отказ ничтожен	≈ 0	≈ 1	≈ 1	Экспертная оценка приведена с учётом результатов расчётов P14
Свойство углепластиковых трубок сохранять стабильность характеристик в процессе изготовления	$C_{2.2}$	Отказы вполне вероятны	От 0,005 до 0,01	От 0,99 до 0,995	0,995	Экспертная оценка приведена с учётом анализов, приведенных на с. 285
Свойство композиционных материалов сохранять стабильность при длительном пребывании в условиях ФКП	$C_{2.3}$	Отказ практически невероятен	Менее 0,000 05	Более 0,999 95	0,999 5	Экспертная оценка приведена с учётом результатов расчётов P21

С учётом сказанного выше, а также (6.18) и данных табл. 6.8, надёжность по жёсткости равна

$$P_{\text{ж}}(C) \leq \prod_{i=1}^3 P(C_{2,i}) = 0,9949. \quad (6.22)$$

На основании модели цепи (6.20) с учётом (6.21) и (6.22) безотказность штанги в рабочем положении на конец срока активного существования оценивается на уровне 0,871, что ниже заданного уровня безотказности штанги в рабочем положении, равного 0,995.

6.4.3. Выводы по результатам анализа надёжности штанги рефлектора в рабочем положении

Согласно проведённым исследованиям можно сформулировать результаты анализа и оценки надёжности штанги рефлектора в рабочем положении.

1. Анализ надёжности штанги рефлектора в рабочем положении произведен по двум критериям, установленным в ТЗ на разработку, – по заданным параметрам свойств точности и жёсткости.

2. По результатам поведения КТАН установлено, заданная точность штанги рефлектора в рабочем положении обеспечивается за счёт проявления одиннадцати свойств КЭ, а заданная жесткость – трёх свойств.

3. Для расчётов надёжности по свойствам точности и жёсткости использован метод структурной схемы надёжности. Выяснено, что надёжность штанги в рабочем положении по точности не более 0,871, а по жёсткости – 0,994 9.

4. Для расчётов надёжности штанги рефлектора в рабочем положении использован метод фиктивных элементов, согласно которому реальный элемент (штанга рефлектора) был заменён двумя фиктивными элементами, один из которых рассматривался в предельном состоянии по точности, а другой – по жёсткости. Отказ любого из фиктивных элементов рассматривался как отказ реальной штанги рефлектора.

Поскольку свойства точности и жёсткости проявляются одновременно и в одинаковых условиях факторов космического пространства, а отказ по одному из указанных свойств не приводит к отказу по другому свойству, то для оценки надёжности штанги рефлектора в рабочем положении применена модель цепи, согласно которой надёжность оценивается по минимальному из значений надёжности свойств точности и жёсткости.

5. Исходя из модели цепи, расчётное значение надёжности штанги рефлектора в рабочем положении будет не более 0,871, что не удовлетворяет заданному значению ВБР, равному 0,995.

6. Из результатов оценки надёжности штанги рефлектора в рабочем положении следует, что в КД содержится недостаточный объём требований для изготовления штанги с заданной безотказностью в рабочем положении, равной 0,995.

7. Расчётное значение безотказности штанги рефлектора в рабочем положении свидетельствует о том, что процедуры конструкторского обеспечения надёжности при разработке документации в полном объёме не выполнены, необходимо проведение дополнительных расчётов и установление дополнительных требований в КД, что подтверждается результатами анализа, приведенного в табл. 6.6.

8. После проведения дополнительных расчётов необходимо принять конструкторские решения по изменению конструкции штанги и установить требования в КД, выполнение которых гарантирует безусловное нахождение значений расчётных показателей и параметров в заданных диапазонах.

9. После корректировки КД требуется провести повторный анализ и оценку надёжности штанги в рабочем положении вплоть до выполнения заданного требования по ВБР.

6.4.4. Рекомендации по проведению дополнительных расчётов

Для обоснования диапазонов изменения параметров и показателей, при которых обеспечивается заданная работоспособность штанги рефлектора, необходимо дополнительно провести следующие расчёты:

- на смятие площадки контакта соединителя и законцовки центрального узла складывающихся стержней;
- погрешностей, вызванных средствами и методами измерений штанги рефлектора в рабочем положении при юстировке;
- погрешностей вследствие геометрической нестабильности процессов намотки углепластиковых трубок;
- погрешностей из-за наличия люфтов в механизмах;
- погрешностей штанги рефлектора вследствие возможных разрушений целостности клееных соединений при эксплуатационных нагрузках на орбите в условиях длительного пребывания в космосе.

ГЛАВА 7

ПРИНЦИПЫ И ПРАВИЛА ПРОЕКТИРОВАНИЯ РАСКРЫВАЮЩИХСЯ КОНСТРУКЦИЙ

7.1. Подходы к разработке высоконадёжных изделий

Методы конструкторско-технологического анализа надёжности позволяют снижать негативные последствия неудачных конструкторских решений, но имеют некоторые ограничения на их первоначальный выбор. Эти ограничения связаны с тем, что проведение анализов в той или иной степени запаздывает к принятию конструктором решений. Причём эффективность КТАН снижается по мере завершения разработки изделия, когда становится сложно что-либо менять из-за исчерпания лимита времени и средств. В этом случае остаётся возможность нивелировать неудачные конструкторские решения путём внесения косметических изменений в КД и неоправданного ужесточения технологических требований к производству. Однако при своевременном проведении анализов (на самых ранних стадиях разработки) существует возможность выполнить кардинальные изменения конструкций, направленные на повышение их надёжности.

Отвлечёмся на некоторое время от раскрывающихся конструкций и рассмотрим характерный пример, который связан с нестабильностью разрушения металлокомпозитного бака высокого давления [248], показанного на рис. 7.1. Этот пример подтверждает важность исходных конструкторских решений.

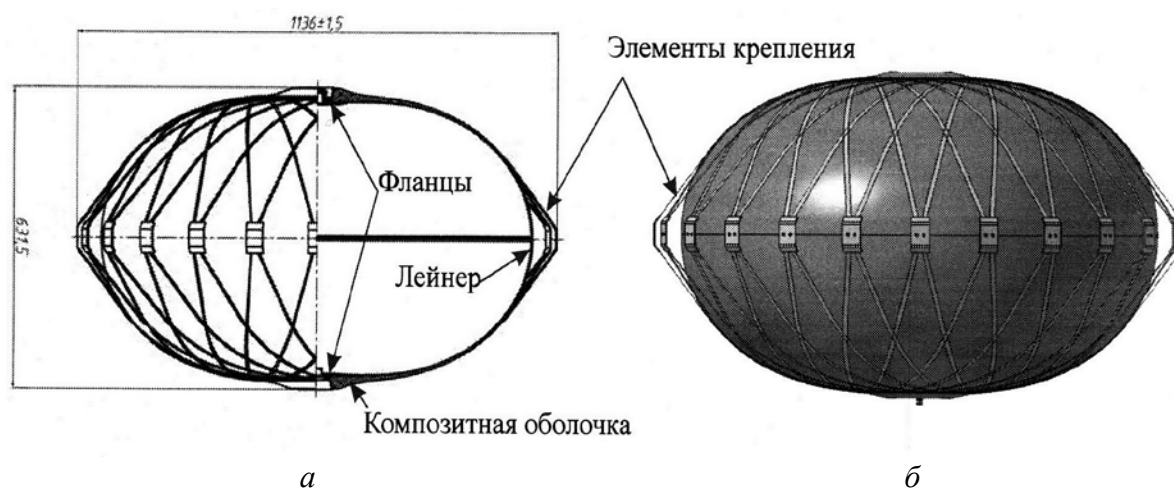


Рис. 7.1. Конструкция (а) и общий вид (б) металлокомпозитного бака высокого давления

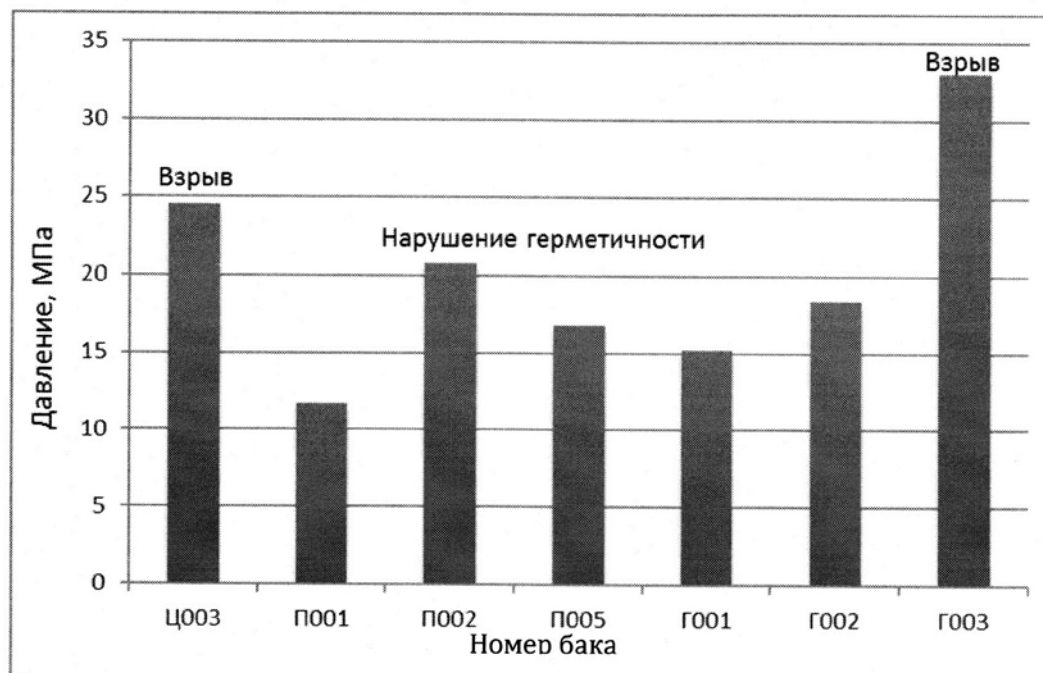


Рис. 7.2. Предельные давления и характер разрушений баков

На рис. 7.2 приведены уровни разрушающих давлений и характер разрушений баков при испытаниях.

Как показали металлографические исследования, в большинстве случаев разрушения баков были вызваны растягивающими напряжениями в зоне сварного шва между фланцем и лейнером, превышающими предел прочности. При этом причинами нестабильности разрушающих давлений были дефекты изготовления лейнера:

- структурно-механическая неоднородность металла сварного шва;
- несанкционированные технологические вмятины на лейнере;
- трещины и непроплавы в сварных швах;
- окисные плёнки на поверхности металла перед сваркой;
- коррозионные микротрещины в металле;
- механические повреждения при поверхностных зачистках металла в зоне сварных швов.

Часть перечисленных дефектов оказалось возможным устранить путём ужесточения требований к изготовлению лейнера, включая:

- введение запрета на замены материалов фланцев и использование однородных в структурном отношении металлов для сварки;
- безусловное выполнение требований к свариваемым деталям и их сборке согласно типовым техническим требованиям;
- снижение допусков на толщины стенок фланца и лейнера в сварном стыке;

- полный контроль за операциями по подготовке поверхности деталей под сварку согласно типовым техническим требованиям;
- проведение непосредственно перед сваркой дополнительной зачистки и обезжиривания поверхностей под сварку деталей из титановых сплавов;
- удаление альфированного слоя с поверхности титановых деталей лейнера;
- ограничения по отклонению формы лейнера и проведение инструментального контроля геометрии профиля после сварки;
- зачистку глубоких механических повреждений с контролем геометрии и микрорельефа поверхностей;
- проведение неразрушающего контроля сварных швов, например методом цветной дефектоскопии.

Введение технологических ужесточений позволило добиться некоторой стабильности разрушающих давлений, но при этом запас прочности бака оставался на минимально допустимом уровне. В то же время расчёты на прочность показывали, что сварной шов фланца располагался в локальной зоне максимального напряжённо-деформированного состояния лейнера, которая обусловлена конструктивными особенностями бака. Решение по переносу сварного шва из зоны максимальных напряжений лейнера за счёт уменьшения диаметра фланца позволило резко снизить чувствительность разрушающих давлений к наличию технологических дефектов и отклонений, что привело к стабилизации уровней разрушающих давлений и существенному повышению запаса прочности. Этот пример показывает, что путь к обеспечению надёжности может лежать как через ужесточение требований к изготовлению в случае нерациональных конструкторских решений, так и принятие оптимальных технических решений, позволяющих даже снижать уровень таких требований. При этом во втором случае достигается наибольшая эффективность, что лишний раз подтверждает: *с помощью «сомнительных» элементов можно собрать довольно надёжную систему и, напротив, безнадёжно надеяться, что плохо продуманная система может оказаться первоклассной даже при использовании самых лучших деталей* [249].

С позиций идеологии проведения КТАН основой обеспечения надёжности является выполнение необходимых и достаточных требований как *«потребностей или ожиданий, которые установлены, обычно предполагаются или являются обязательными»* [250]. Очевидно, что число требований по мере детализации проработки увеличивается. Однако, как видно из приведённого примера с металлокомпозитным баком, требования КД есть следствие и развитие уже принятых ранее технических решений.

Образно говоря, в начале любой разработки всегда задаётся вопрос: «Как будем строить “мост”, вдоль или поперёк?»⁶. Затем встаёт вопрос: «Каким будет этот “мост”: деревянным, каменным, стальным или железобетонным?». И только после разрешения этих вопросов начинается детальная проработка конструкции «моста» вплоть до «винтиков». Если же перед производителями поставить задачу: построить «мост» без предварительной разработки, то это сделать будет невозможно без подробного плана действий в виде чертежей, где должны быть установлены конкретные требования, как именно этот «мост» построить. Причём очевидно, что требования к изготовлению «моста» будут следствием неких изначально установленных условий, которые определяются принципами и правилами его разработки. Как строить «мост» определяют принципы, каким быть «мосту» – правила, а как именно его изготовить – требования. Причём требования вытекают из правил, а правила – из принципов, являясь все вместе средством реализации задуманного. Таким образом, требования – это развития принципов и правил проектирования, которые вместе образуют иерархическую структуру (рис. 7.3).



Рис. 7.3. Иерархическая взаимосвязь принципов, правил и требований

⁶ В 2015 г. в китайской провинции Хубэй был построен четырехкилометровый мост вдоль русла реки. Причиной тому послужил конфликт интересов: местные фермеры не хотели уступать свои земельные участки, экологи протестовали против подкопа горы, а смета на прокладку тоннеля через гору превзошла бюджет строительства моста [251].

Надёжность изделий напрямую зависит от эффективности принимаемых в процессе разработки технических решений, которые в свою очередь определяются принципами, правилами и требованиями, используемыми при проектировании и конструировании. Причём указанные понятия взаимосвязаны и несут конкретную смысловую нагрузку.

Принцип – это основополагающая истина, не требующая доказательств, которая формирует общую стратегию действий. Принципы придумать нельзя, они действуют независимо от сознания человека, потому что происходят из физических законов и закономерностей. Принципы используют для выработки проектных решений, как *«промежуточных или конечных описаний объекта проектирования, необходимых и достаточных для рассмотрения и определения дальнейшего направления или окончания проектирования»* [103]. Число принципов ограничено основополагающими факторами, каждый из которых выражает физическую сущность того или иного явления, влияющего на надёжность. Сущность этих явлений объективна и неизменна, например, число функциональных элементов должно быть минимальным, изделие в процессе эксплуатации не должно разрушаться, энергии приводов должно быть достаточно для осуществления предписанных перемещений, КЭ должны дублироваться и т. п. Или же, как показано в примере с металлокомпозитным баком, технологические стыки должны располагаться вне зоны максимальных действующих напряжений при эксплуатации. Принцип – это теоретическая основа дальнейших рассуждений, решений или действий, в нём не содержится конкретных указаний на способы осуществления, просто это должно быть так, а не иначе. Для реализации принципов используют правила, которые вытекают из принципов, ими определяются и конкретизируют применение принципов.

Правило – это первооснова, закономерность, служащая руководством в чём-либо, которая основана на устойчивой взаимосвязи между явлениями, установленном порядке или нормах деятельности. Принципы и правила существуют объективно, независимо от нас, отступление от них нарушает порядок вещей.

Рассмотрим пример, дающий представление о том, чем отличаются принципы от правил. Энергоизбыточность приводов раскрытия (см. п. 2.7.4) – это принцип обеспечения работоспособности поворотной конструкции в условиях неопределённостей внешних условий, разбросов физических свойств материалов и технологических допусков. Значение энергоизбыточности определяется правилами по выбору соотношения моментов движущих сил и моментов сил сопротивления в поворотном узле для конкретных типов приводов (2.24)–(2.25), которые учитывают действующие сопротивления, инерционность раскрываемых конструкций, комбина-

цию наихудших факторов и т. п. [97]. Принцип указывает, как должно быть (необходимо обеспечить энергоизбыточность), а правило уточняет, как именно это должно быть осуществлено. Например, запас движущего момента должен быть не меньше трёх, его выбирают исходя из худших сочетаний факторов (см. п. 2.7.1) и обеспечивают в любом угловом положении конструкции при условии нулевой кинетической энергии, выбранный запас движущего момента не должен приводить к разрушению конструкции в момент фиксации её в рабочее положение (4.25) и т. п.

Правил без принципов существовать не может. Правила используются для выработки конкретных проектных и конструкторских решений. Они есть переходное звено от теории к практике, поэтому часто являются концентрированным опытом, который должен учитываться в новых разработках во избежание ошибок. Этот опыт может применяться в форме памяти о прошлом *«так ещё деды делали»*, либо отражаться в положениях нормативно-технической документации в формализованном виде. К сожалению, проследить, насколько оправданно и действительно используют правила крайне сложно, для этого они должны быть, по меньшей мере, сформулированы и обобщены, как, например, в работе [26], при этом для новых разработок правил ещё не существует по определению. С позиций идеологии конструкторско-технологического анализа надёжности, следование правилам – это необходимое, но недостаточное условие обеспечения надёжности.

Надёжность не может быть достигнута только лишь благодаря следованию определённым принципам и правилам, она обеспечивается в результате неукоснительного исполнения требований, направленных на достижение стабильности проявления заданных свойств объектов. Требования должны быть в обязательном порядке установлены при выпуске конструкторской документации.

Требования к надёжности на этапе конструирования могут быть сформулированы в результате применения целенаправленных процедур и анализов [217] и установлены в графической и текстовой форме на поле чертежа, в технических условиях и других конструкторских документах. Их исполнение в конечном счёте направлено на безусловное выполнение изделием своих функциональных задач. При этом на производстве возникает достаточно поводов и причин отступить от требований КД при изготовлении, нарушить технологические процессы и технологическую дисциплину, недостаточно или неэффективно использовать средства и методы неразрушающего контроля и т. п., что неизбежно приводит к дефектам и браку.

Последовательность применения принципов, правил и требований при проведении проектно-конструкторских работ можно показать на графике (см. рис. 4.7). На стадии $0-t_1$ (отрезок графика $0-A$) закладываются

основные тактико-технические характеристики будущего изделия. Достижение этих характеристик определяется использованием наиболее общих стратегических принципов как основополагающих истин, позволяющих формировать проектные решения для осуществления будущего изделия. Рациональные принципы работы будущего изделия – залог его надёжности.

На стадии t_1-t_2 (отрезок графика $A-B$), по мере увязки проекта, выбранные принципы осуществления изделия должны быть реализованы в проектные и конструкторские решения при помощи правил проектирования [203]. Число таких правил может быть значительным, они направлены на решения частных задач и отображают определённые закономерности причинно-следственных связей. Принципы отражают сущность явления, а правила – его отдельные стороны. Правила проектирования универсальны для определённого типа изделий, поэтому могут нормироваться.

Основа обеспечения надёжности – это выполнение требований как осознанной необходимости соблюдения условий, которые должны быть строго исполнены при производстве изделий. Такие требования в обязательном порядке устанавливаются на стадии t_2-t_3 (отрезок графика $B-C$) и в явном виде отражены в КД. Количество требований всегда больше используемых принципов и правил, поскольку они индивидуальны для каждого разрабатываемого изделия и используются для детализации принятых конструкторских решений.

Для установления необходимых и достаточных требований обязательно проводят оцифровку конструкций (см. рис. 5.1). Результаты оцифровки в виде вектор-столбцов (5.3) и (3.20) могут служить основой составления контрольного списка для оценки полноты установленных требований в бинарном виде: «требование установлено» или «требование не установлено». Достаточность установленных требований в КД определяется их релевантностью с параметрической моделью на основе контрольного списка.

Наличие принципов и правил проектирования в формализованном виде до начала разработки позволяет конструктору избежать грубых ошибок. В этом случае методы конструкторского анализа надёжности превращаются в средство, позволяющее конструктору не допускать мелких ошибок (о чём-то не забыть, лишний раз что-то проверить, дать возможность критически настроенному проверяющему посмотреть на результаты своей работы «незамыленным» взглядом и т. п.). Кроме того, с помощью КТАН могут быть обнаружены грубые неисправимые ошибки, как, например, нарушение принципа равнопрочности выполнения заданных функций при выборе конструктивно-компоновочной схемы УС (см. рис. 6.5).

7.2. Принципы и правила проектирования

Триада «*принципы – правила – требования*» применительно к проектированию и конструированию не имеет должного отражения на понятийном, терминологическом и нормативном уровне, однако существует определённый практический опыт, требующий обобщения.

Принцип «*сделал → не отказало → делай в следующий раз точно так же*» является в практике создания космических аппаратов основным и незыблемым. Этот принцип заложен в идеологию разработок всех КА в виде постулата – каждый используемый узел должен иметь лётную, или, по крайней мере, протолётную квалификацию. Применение указанного принципа в практической деятельности неизбежно приводит к выработке набора правил проектирования, указывающих на то, что и как именно нужно делать, а также что и как делать ни в коем случае нельзя. Такие правила не могут быть общедоступными по причине того, что вырабатываются в изолированной узкопрофессиональной среде, причём они по разным причинам не систематизируются и не формализуются, зачастую являясь местечковым инженерным «фольклором», с помощью которого из поколения в поколение передаётся определённый накопленный опыт. Рано или поздно такое наследие становится достоянием эпигонов либо предаётся забвению при нарушении естественного хода смены поколений конструкторов и технологов, как это произошло в России в 1990-х гг. в силу трагических событий ломки государства. В таком случае результат – это падающие ракеты и аварии на КА в безобидных ситуациях, которые прежде были немыслимы.

В начале 1990-х гг. автор сформулировал правила проектирования МУ ОС, которые ранее не были опубликованы. В чём-то они потеряли свою значимость (изменилась сама техника, изменились и требования к технике), а в чём-то по-прежнему актуальны и полезны.

1) Механические устройства должны выдерживать условия эксплуатации без остаточных деформаций, несанкционированного изменения взаимного положения деталей и нарушения характеристик сопряженных поверхностей, включая отсутствие следов коррозии, износа, снятия защитных покрытий, смятия контактных поверхностей, сохранение подвижности.

2) Механизмы должны обеспечивать запасы движущих момента и/или усилия, по крайней мере 100 % (отношение 2:1), относительно худшего сочетания, необходимого на орбите, включая тепловые эффекты, старение, механическую регулировку, погрешность изготовления, минимальную мощность привода и износ к концу существования.

3) Требование по запасам движущих моментов и/или усилий должно удовлетворяться в любом положении в пределах диапазона движения из предположения нулевой кинетической энергии.

4) При проведении испытаний и регламентных работ любой замок системы зачеховки обязан иметь возможность функционирования без изменения настройки.

5) В конструкции замков системы зачеховки необходимо предусматривать возможность, исключаящую их нагружение при температурных деформациях.

6) Нагрузка на запирающие элементы замка системы зачеховки пружинами раскрытия должна быть только в направлении раскрытия. Остальные составляющие нагрузки воспринимаются неподвижными опорами. При отсутствии неподвижных опор замок системы зачеховки не должен саморасчеховываться под нагрузкой ниже несущей способности замка.

7) Между запираемым и запирающим элементами замков системы зачеховки выполняют минимальный технологический зазор либо строго фиксированное усилие поджатия.

8) Механические устройства поворотного типа обязаны иметь пружинные толкатели для начального страгивания. Местоположение и характеристики толкателя определяются величиной трения покоя, моментом инерции и жёсткостью конструкций, а также требованиями п. 2 по запасу усилия страгивания. Ход пружинного толкателя должен обеспечивать сопровождение МУ до полного выхода из опорных ложементов.

9) Все механизмы (за исключением подшипников, выходных зубчатых колес) запирающих и запираемых элементов должны иметь резервные элементы. Отказ одного из резервных элементов не должен приводить к отказу механизма в целом.

10) Характеристики привода обязаны быть максимальными в пределах прочности силовой части конструкции;

11) После срабатывания механизмов должно быть предусмотрено улавливание обособленных разлетающихся частей.

12) Упругая деформация мест крепления пружинного привода не может превышать установленный предел, а напряжения – предел пропорциональности.

13) Шарнирные узлы должны иметь гарантированные зазоры с учётом теплового расширения и наносимого твёрдосмазочного покрытия. При организации шарнирного узла двумя и более шарнирами следует предусматривать продольно-поперечную тепловую развязку.

14) Для обеспечения последовательности раскрытия, предотвращения соударений и обеспечения требуемого положения в шарнирных узлах необходимо предусмотреть жёсткую фиксацию раскрываемых элементов.

15) Для обеспечения требуемой траектории раскрытия конструкции должны иметь устройства, упорядочивающие раскрытие звеньев, а каждый

шарнирный узел – привод. Отказ одного из приводов не должен приводить к отказу МУ в целом.

16) Механические связи (тросы) не могут изменять функциональных характеристик замков системы зачеховки вследствие действия вибраций, натяжения и температурных деформаций.

17) Усилие протяжки троса в оболочке Боудена обязано быть минимальным, для чего предусматривают покрытие троса антифрикционным покрытием, оптимальное соотношение диаметров троса в боуденовской оболочке, максимальные радиусы перегибов прокладываемой трассы.

18) Механические связи должны освобождать замки системы зачеховки при любом сочетании вариантов срабатывания резервируемых пирсредств.

19) Для обеспечения необходимых с точки зрения функционирования зазоров в замках системы зачеховки и стабильности натяжения тросов предусматривают устройства (талрепы), регулирующие натяжение тросов.

20) Подвижности электрического кабеля в узлах крепления, расположенных на двух смежных поворотных частях конструкции, не допускаются.

21) Длина электрического кабеля должна обеспечивать складывание и развёртывание элементов конструкции без натяжения в рабочем диапазоне температур, предусмотренных условиями эксплуатации, недопустимых скручиваний и перегибов согласно требований стандарта [252].

22) Прокладка электрического кабеля, а также любое принудительное изменение трассы кабеля в любом положении шарнирного узла должна исключать зацепление кабеля за элементы конструкций и зажатие между подвижными частями.

23) При прокладке электрического кабеля необходимо исключить его соприкосновение с любыми частями конструкции (кроме мест крепления) на полном угле раскрытия.

24) В случае невыполнения п. п. 22 и 23, а также прокладки нескольких жгутов кабелей, трасса кабелей в районе ШУ обязана быть сформирована с помощью направляющих элементов;

25) Жёсткость электрического кабеля в рабочем диапазоне температур должна сохранять технически обоснованную стабильность.

26) Закрепление электрического кабеля, форма его петли, а также расположение проводов в кабеле должны обеспечивать минимальное сопротивление раскрытию и максимальную стабильность на полном узле раскрытия.

27) Телеметрические датчики должны иметь регулировки хода и усилия срабатывания, а положение датчика – обеспечивать его срабатывание не раньше момента зачеховки ШУ;

28) Пружина привода обязана сохранять свои жесткостные характеристики на полном угле раскрытия, при этом не допускаются её плотная посадка на вал, посадка витков, трение в направляющих обоймах.

29) Сопротивление повороту в шарнире должно быть минимальным, для чего после нанесения смазки в подшипнике производят приработку под расчётной нагрузкой, а в шарнирных узлах не допускается использование пружин, работающих при раскрытии на взведение;

30) Логика раскрытия МУ должна (по возможности) обеспечивать начальный импульс движения, направленный в сторону раскрытия.

31) Сопряженные поверхности подшипников не должны иметь острых граней, ортогональных направлению вращения.

32) Шарнирные узлы в рабочем положении не должны иметь угловой люфт во взаимно перпендикулярных направлениях. Отсутствие угловых люфтов обеспечивается конструкцией устройств фиксации в диапазонах нагрузок, возникающих при управлении КА на орбите.

33) Шарнирные узлы обязаны быть защищены от попадания в них пыли при эксплуатации.

34) Закрепление обойм не должно ухудшать фрикционные характеристики подшипников, например за счёт деформации обойм при сборке ШУ.

35) Не допускается подвижность обойм подшипников относительно мест закрепления.

К представленному выше списку полезно добавить правила проектирования подвижных механических узлов, которые были опубликованы в 1997 г. в книге под общей редакцией *Peter L. Conley* [26].

1) Используйте большие запасы по силе и крутящему моменту для раскрытий: обычно требуется запас в 100 %, отнюдь неплохо показать и 200 % на CDR (при критическом обзоре проекта), а на PDR (при предварительном обзоре проекта) будет разумно начать с 400 %. Этот запас может быть увеличен в начале раскрытия за счёт применения пружин отделения;

2) Избегайте применения неуправляемых механизмов.

3) Используйте механические ограничители для защиты ваших раскрываемых систем и окружающей их матчасти в случае неуправляемых раскрытий.

4) Удостоверьтесь, что для ручной укладки аппаратуры требуется лишь разумное количество рук.

5) Обеспечивайте доступ к оборудованию в сложной конфигурации для ручной проверки всех концевых выключателей на предмет их функциональности.

6) Не верьте, что трение может помочь на орбите.

7) В случае необходимости используйте кинематические крепления, чтобы изолировать раскрываемые системы от вибрации КА или чтобы защитить его от динамики раскрытия.

8) Предварительно нагружайте жёстко закреплённые замки, которые обезопасят аппаратуру на всех этапах до раскрытия.

9) Определите и спроектируйте все соответствующие условия воздействия внешней среды на механизмы раскрытия, включая изготовление и сборку, приёмочные испытания, хранение, отправку, интеграцию и проверки КА, его запуск и работу на орбите.

10) Как можно ранее (по программе) определите и испытайте всё наземное вспомогательное оборудование, которое может потребоваться до момента запуска.

11) Рассчитайте и испытайте, если возможно, все запасы на полностью собранной матчасти.

12) Измерьте все критичные зазоры на всех блоках, чтобы подтвердить, что они находятся в заданных пределах; если они слишком большие или слишком малые, то это может означать, что где-то допущена ошибка.

13) Всегда уделяйте особое внимание испытаниям на прочность, включая вибрационные; это абсолютно необходимо, чтобы быть уверенным в своей разработке и в том, что она стоит затрат на неё.

14) Помните о гравитационных эффектах во время проведения наземных испытаний, это может оказаться не только полезным и неожиданным, но и очень важным.

15) Ещё раз проверьте и подумайте, что может предположительно пойти неправильно, будет лучше, если это сделает беспристрастный, но критически настроенный проверяющий, а не проектант или главный инженер, которые в данном случае помочь не могут, поскольку будут думать о том, каким образом система будет работать, но не о том, каким образом она откажется работать.

16) Если возможно, делайте проектную разработку таким образом, что, если что-то пойдёт не так, должна быть возможность исправить ситуацию, хотя бы частично.

17) Если в системе имеется мотор, сделайте так, чтобы он был реверсным, даже если этого и не требуется, тогда у вас будет возможность вернуться в исходное положение и сделать еще одну попытку, если раскрытие «зависнет».

18) Всегда следует применять резервирование, если это можно сделать просто и легко.

19) Чтобы добиться максимальной надёжности, конструкция механизма должна быть простой, элегантной и спроектирована с щедрым, но не грубым, запасом прочности в областях точек единичного отказа.

Приведём некоторые правила обеспечения надёжности МУ ОС на различных стадиях жизненного цикла, изложенные в работе А.К. Шатрова [28]:

1) На этапе проектирования:

- осуществление проектирования на основе отработанных решений;
- обеспечение заданных запасов прочности и запасов моментов движущих сил;

- применение простых конструкторских решений;

- использование всех видов резервирования и пр.

2) На этапе конструирования:

- выбор типов и параметров приводов раскрытия в шарнирных узлах, обеспечивающих превышение момента движущих сил над моментом сил сопротивления не менее 200 % на всём угле раскрытия;

- применение толкателей, создающих небольшим усилием значительную величину движущего усилия в момент страгивания конструкции из стартового положения;

- дублирование пружинных приводов сдерживающими электромеханическими приводами с двойным функциональным назначением;

- использование подтягивающих устройств, работающих в момент фиксации ШУ в рабочем положении, дополнительно с приводами раскрытия;

- исключение неуправляемых механизмов и схем развёртывания и пр.

3) На этапе изготовления:

- проверка наличия запасов по усилию или движущим моментам, неразрушающий контроль изготовленных комплектующих;

- исключение компромиссов при решении вопросов использования задела с дефектами в состоянии «как есть»;

- бережное отношение к материальной части на всех этапах изготовления деталей и сборочных единиц, их монтажа и окончательной сборки;

- широкое использование приёмо-сдаточных испытаний по завершению сборочных работ.

Немаловажным дополнением к приведённым правилам проектирования МУ ОС могут служить требования к надёжности замков разделения составных частей КА, реализующих концепцию сквозного удержания [253]:

- в требованиях на замок необходимо указать вероятность его безотказной работ (подтверждается расчётом надёжности);

- ресурс срабатываний замка составляет не менее 25 срабатываний, из них не менее пяти – для работы по целевому назначению, остальные срабатывания в процессе проверок при изготовлении КА;

- конструкция замка обеспечивает запас движущих сил (моментов) относительно сил (моментов) сопротивления не менее 200 % (отношение 3:1) для худшего случая;

- конструкция замка гарантирует возможность функционирования в конце срока хранения и наземной эксплуатации, а также разовое срабатывание после вывода КА на орбиту;
- нагруженные части замка до срабатывания должны быть неподвижными;
- положение замка в пространстве при взведении должно быть безразлично и обеспечено однозначное положение стыкуемых деталей;
- конструкция обеспечивает контроль правильного взведения замка (например по наличию зазора, усилия и т. п.), а также величину усилия затяжки замка;
- детали функциональных частей замка после начала их движения должны разгружаться;
- исходные данные на замок должны содержать расшифровку термина «срабатывание замка», что необходимо для задания критерия испытаний;
- необходимо учитывать температурную деформацию и наличие гарантированных зазоров при срабатывании.

Приведённые правила проектирования ценны тем, что являются редкими в силу специфичности прикладной области техники, к которой относятся МУ ОС, к тому же за каждым правилом стоит многолетний опыт [28].

Не менее важны при создании механизмов раскрытия КА общинженерные правила конструкторского и технологического обеспечения надёжности, которые закреплены общей практикой применения. Разработчики всегда должны иметь их под рукой.

К общинженерным конструкторским правилам обеспечения надёжности, применимым к МУ ОС, относятся: рациональный выбор материалов деталей; обеспечение надлежащей конфигурации деталей для обеспечения прочности, износостойкости, жёсткости, ремонтпригодности, улучшенного теплоотвода и пр.; установление оптимальных зазоров и натягов в сопряжениях деталей с применением расчёта размерных цепей; установление датчиков и контрольно-измерительных приборов, осуществляющих контроль состояния параметров работы устройств и конструкций; повышение уровня ремонтпригодности узлов и механизмов; использование резервирования и избыточности; стандартизация деталей и узлов; упрощение конструкции и пр.

К общинженерным технологическим правилам обеспечения надёжности, применимым к МУ ОС, относятся: обеспечение системы технологической подготовки; упрочнение деталей с помощью поверхностного пластического деформирования; упрочнение деталей химико-термическими методами обработки; применение защитных покрытий и наплавов; контроль качества точности выполнения размеров и качества поверхности деталей; внедрение автоматизированных систем управления технологических процессов и т. д.

Среди правил повышения надёжности, имеющих авторство, следует отметить конструктивные правила повышения надёжности, приведённые В.Ю. Шишмарёвым [254]: создание запасов прочности конструкции; облегчение режимов работы элементов; упрощение конструкции; использование стандартных деталей и узлов; учёт факторов инженерной психологии; обеспечение ремонтпригодности и возможности проведения текущих испытаний и контроля; меры, позволяющие успешно выполнить специальные технологические процессы; обеспечение благоприятных окружающих условий работы устройства; обоснованное использование резервирования; учёт материалов, содержащихся в оперативных отчётах по разработке, и принятие необходимых корректировочных мер для устранения вероятных причин ненадёжной работы устройства.

В.Ю. Шишмарёв также акцентирует внимание на недооценённых, но чрезвычайно важных факторах инженерной психологии. В первую очередь, это забота о том, чтобы неправильная сборка или неправильное использование созданной конструкции были затруднительными. По возможности длину кабелей выбираю таким образом, чтобы можно было соединить с соответствующим разъёмом только нужный кабель; разъёмы должны отличаться по размерам, чтобы подходил только конкретный ответный разъём соответствующего кабеля; если поставлено условие возможности замены функционального узла, то проблемы, связанные с удалением и заменой его малоквалифицированным персоналом в эксплуатационных условиях, должны быть тщательно рассмотрены и решены оптимальным образом.

Второй важный момент, отмеченный В.Ю. Шишмарёвым и требующий развёрнутого пояснения: конструкторам и специалистам по надёжности необходимо внимательно относиться ко всем случаям отказов и неувязкам конструкции, сведения о которых поступают из отчётов о разработке, конструктивного анализа, приказов на изменение чертежей, формальных программ испытаний, отчётов о неисправностях и отказах при эксплуатации, материалов исследования причин отказов.

Хрестоматийные правила повышения надёжности можно почерпнуть у П.И. Орлова [255]. Во-первых, это применение рациональных приёмов повышения прочности, не требующих увеличения массы (применения выгодных профилей и форм, максимального использования прочности материала, равномерности распределения нагрузки на элементы конструкции); во-вторых, применение целесообразных способов повышения жёсткости (правильного выбора схемы нагружения, рациональной расстановки опор, придания конструкции жёстких форм).

Важно и полезно пользоваться общими правилами повышения надёжности конструкций, деталей машин и механизмов, изложенными, например, в работах [249; 256–258].

Любопытен подход, сформулированный А.М. Половко для абсолютно надёжных систем длительного действия [3]. При создании высоконадёжных систем он рекомендует пользоваться качественными критериями, которые не требуют расчётов надёжности. Такие критерии должны удовлетворять условиям непротиворечивости численным показателям; независимости от численных показателей при проектировании технических систем; физичности и лёгкой реализуемости на практике; достоверности результатов.

Приведём примеры комплексных качественных критериев для абсолютно надёжных систем:

- система абсолютно надёжна, если она состоит из числа элементов $n \leq m$ (m – кратность резервирования) и отказ одного любого элемента не ведёт к отказу системы;
- если время её непрерывной работы не превышает заданного времени T_3 и все элементы работают с нагрузкой, не превышающей определённый процент от номинальной величины;
- если время восстановления системы не превышает заданного и отказ одного любого механического элемента не ведёт к её отказу.

Приведённый обзор правил, предназначенных или пригодных для проектирования и конструирования РК, может быть использован в качестве шаблонов для формирования правил разработки тех или иных типов конструкций. На основе этих правил проектирования и конструирования с учётом специфики, современных подходов и технологий создания раскрывающихся конструкций можно предложить примерный перечень принципов проектирования.

- 1) Конструктивная простота (уменьшение числа взаимосвязей элементов).
- 2) Минимизация мест крепления конструкций в стартовом положении, требующих разделения и отделения.
- 3) Обеспечение прочности.
- 4) Энергоизбыточность приводов (обеспечение работоспособности сверх минимальной достаточности).
- 5) Резервируемость конструкций (по мере возможности).
- 6) Организация движения в заданных зонах, с заданной последовательностью и с заданными параметрами движения.
- 7) Контролепригодность (доступность проведения контроля состояний).
- 8) Создание начальной скорости движения при страгивании (преодоление трения покоя).
- 9) Разделение контактных поверхностей пар сопряжения антифрикционным слоем (предотвращение холодной сварки в вакууме);

- 10) Повторяемость сборочных работ (отлаженность технологического процесса).
- 11) Регулируемость (возможность регулировок и настроек положения).
- 12) Температурные развязки (безразличность к напряженности теплового поля).
- 13) Исключение монтажных деформаций.
- 14) Непринципиальность положений устройств при сборке с точки зрения настроек и регулировок.
- 15) Обеспечение ресурса работы при наземной эксплуатации и испытаниях.
- 16) Безлюфтовость соединений в пределах управляющих воздействий на орбите.
- 17) Геометрическая стабильность (после снятия воздействия конструкция должна вернуться в исходное состояние).
- 18) Обеспечение требуемой жёсткости в рабочем положении.
- 19) Разделение первых парциальных частот собственных колебаний изделия и внешних воздействий.
- 20) Снижение неопределённости напряжённо-деформированных состояний конструкций.

Принципы и правила применяют для прямого решения задачи обеспечения надёжности на этапе проектирования. Если же у разработчика по какой-либо причине такие принципы и правила отсутствуют, то в качестве первого шага для их выработки можно использовать методы КТАН.

7.3. Разработка принципов и правил проектирования с использованием методов конструкторско-технологического анализа

Свойство «надёжность» является точной категорией, поэтому оно должно определяться числом⁷ (значениями параметров или показателей),

⁷ В книге премудрости Соломона говорится: «...но вся мѣрою и числомъ и вѣсомъ расположилъ еси» (Прем.11:21). В синодальном переводе с церковнославянского языка это звучит следующим образом: «...но Ты всё расположил мерою, числом и весом». Именно так в своей целесообразности и соразмерности устроен физический мир вне зависимости от нашего представления о нём. Именно так же, по образу и подобию, человек обязан отображать и воспринимать мир в своём сознании. Соответственно, надёжность, как и любое другое физическое свойство, проявляется только *в определённых пределах* (мерой), при установлении и подтверждении чего оно должно быть выражено *количественно* (числом) для соотнесения к *расположению своих границ* (весом).

которое характеризует стабильность свойств объекта в заданных условиях и режимах эксплуатации. Этим отличается существительное «надёжность», которое служит для именованя физического свойства, и прилагательное «надёжный», которое используют для субъективной и подчас эмоциональной характеристики технических объектов. В результате, на первый взгляд, «надёжный» и даже «высоконадёжный» в нашем представлении объект таковым может и не оказаться, если его количественная оценка надёжности не соответствует заданному требованию. Однако если отказ изделия вызван причинами, связанными с неизвестными или непредвиденными на начало разработки условиями эксплуатации, то о невыполнимости заданных требований надёжности не может идти речи, но вновь открывшиеся условия должны быть учтены при разработке последующих изделий. Например, первые спускаемые аппараты автоматических межпланетных станций «Венера» были рассчитаны на давление до 20 атм и были попросту раздавлены в атмосфере планеты, не выполнив до конца поставленных задач, поскольку фактическое давление на поверхности Венеры, как выяснилось позже, составляло около 90 атм.

Таким образом, благодаря знаниям человек всегда может разрабатывать новые изделия в рамках априорных гипотез. Причём производство техники устроено так, что требует от конструктора разработки чертежей изготавливаемого изделия вплоть до «винтика». Самый сложный объект техники содержит в спецификациях чертежей все мельчайшие детали, каждая из которых выполняет строго определённую функцию. Значит, если эти функции предусмотрены и заложены в будущее изделие одним человеком (конструктором), то эффективность их выполнения может быть оценена другим человеком (критически настроенным проверяющим, специалистом по надёжности). Весь вопрос сводится к наличию инструментария (методов) для осуществления такой проверки и ресурсов (времени и денег). Для тех случаев, когда отказ изделия способен привести к несоизмеримо большим потерям, нежели затраты на его разработку и изготовление, вопрос будет только в наличии инструментария для проведения анализов, в качестве которого можно использовать конструкторско-технологический анализ надёжности.

Знание основ работы создаваемой техники, используемых физических законов и методов проведения расчётов физических величин позволяют выполнить КТАН и, соответственно, разработать КД с необходимыми и достаточными требованиями для изготовления. Поскольку требования, правила и принципы создания техники находятся в системе иерархических отношениях, то, благодаря данным, полученным в результате конструкторско-технологического анализа надёжности, есть возможность выполнить их последовательную свёртку до получения соответст-

вующих им правил и принципов (рис. 7.3). Для осуществления такой свёртки можно использовать характеристики принципов, правил и требований, приведённые в табл. 7.1.

Таблица 7.1

Характеристики принципов, правил и требований

Принципы	Правила	Требования
Определяют наиболее общую стратегию решений	Определяют частные решения, вытекающие из используемых принципов	Отражают конкретные решения для реализации используемых правил
Служат одновременно для развития теории и повышения эффективности на практике	Имеют прикладное значение	Служат для исполнения на практике
Число сравнительно невелико	Число, значительно превосходящее число используемых принципов	Число, необходимое и достаточное для точной реализации используемых правил
Направлены на выполнение целевых задач разработки	Направлены на решение частных задач проектирования	Являются целью разработки рабочей конструкторской документации
Отражают общую закономерность	Отражают частную закономерность, обычно отдельную причинно-следственную связь	Отражают необходимые и достаточные конкретные действия при изготовлении

При осуществлении свёртки перечень требований надёжности полезно разбить на группы факторов, определяющих условия безотказности функционирования отдельных элементов или изделий в целом исходя из их физической природы. Приведём примерный перечень требований надёжности для МУ ОС по группам [38].

1) Отсутствие несанкционированных или паразитных усилий в парах трения (исключение монтажных деформаций при сборке, монтаже и креплении; обеспечение необходимых зазоров в сочленениях, превышающих совместные тепловые деформации механических узлов и КА).

2) Исключение препятствий и помех в направлении движения и, по возможности, использование начального импульса движения.

3) Резервирование исполнительных механизмов.

4) Отсутствие факторов, приводящих к несанкционированным последствиям срабатывания РК.

5) Исключение нестабильности геометрических характеристик материалов и конструктивных элементов.

- 6) Минимизация числа складываемых элементов за счёт эффективного использования зоны полезного груза под головным обтекателем РН.
- 7) Оптимизация выбора движущих усилий или моментов.
- 8) Определённость и предсказуемость событий при функционировании.

Полученные методом свёртки принципы и правила, формализованные должным образом, могут быть использованы для разработки последующих аналогичных изделий.

Таким образом, существует два варианта выработки принципов и правил проектирования высоконадёжных изделий: последовательное накопление опыта в результате анализов успехов и неудач [26] или использование конструкторско-технологического анализа надёжности [17–21]. Во втором случае это произойдёт быстрее и эффективнее.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренные вопросы теории и практики обеспечения надёжности механических устройств одноразового срабатывания основаны на методах конструкторско-технологического анализа надёжности, проведение которого позволяет преодолеть противоречия в отношениях между конструкторами, ожидающими от расчётчиков аргументов для выбора и оценки принимаемых ими решений, и расчётчиками, чьи расчёты на основе математических моделей, не верифицированных с реальными конструкциями, вызывают у конструкторов скептически-недоверчивое отношение.

Процедуры конструкторско-технологического анализа надёжности подразумевают проведение определённого числа расчётов физических величин, необходимых для обеспечения работоспособного состояния разрабатываемого изделия. Такие расчёты проводят на основе чек-листа, полученного в результате анализа свойств критичных элементов, отказы которых при функционировании не допускаются. Методы проведения расчётов при этом определяются только требуемой точностью, что позволяет разделять их на проектные (ожидаемые) и полные (окончательные). Разница между проектными и полными расчётами надёжности определяется числом учитываемых факторов, необходимых для подтверждения заданной надёжности. По этой причине методы оценки надёжности на основе конструкторско-технологического анализа надёжности не противоречат прикладным методам теории надёжности: математическим, статистическим и физическим. При этом они позволяют обеспечивать надёжность конструкторско-технологическими методами таких изделий, которые включают элементы с показателями надёжности на основе статистических испытаний, характеризуются кинетикой накопления повреждений при нагружении и деградацией свойств материалов, а также элементы одноразового срабатывания, которые не подчиняются вероятностно-статистическим и физическим моделям теории надёжности.

Обеспечение надёжности на основе конструкторско-технологического анализа надёжности – это не разовая акция по обчёту каких-либо параметров, а процесс, являющийся частью процесса конструирования, который начинается и заканчивается вместе с ним, что, безусловно, требует привлечения дополнительных ресурсов при разработках. Критерием для привлечения таких ресурсов может быть требование к надёжности не ниже 0,999, когда риск совершения конструкторских ошибок становится соизмерим или выше рисков возникновения отказов.

Конструкторско-технологический анализ надёжности используют как для принятия конструктором технических решений, так и в качестве

укрупненного плана действий (дорожной карты) при разработке новых изделий, не имеющих прототипов, для подтверждения выполнения заданных требований, как средство верификации, и инструментария для проведения экспертиз на достижимость целей разработки. Причём в последнем случае его действенность максимальная, поскольку осуществляется критически настроенным проверяющим, думающим, по какой причине изделие непременно должно отказать. Именно поэтому выводы конструкторско-технологического анализа надёжности позволяют конструктору принимать взвешенные технические решения. Причём в отличие от диверсионного анализа [259], применяемого для выявления наиболее существенных скрытых недостатков конструкций в режиме консультационных экспертиз, конструкторско-технологический анализ надёжности служит рабочим инструментом конструирования для обнаруживания явных и неявных человеческих ошибок на основе анализов и расчётов физических величин.

Такой анализ позволяет повысить уровень конструкторских разработок даже в том случае, когда его элементы будут использованы самими конструкторами для выработки и оценок своих решений. Применение конструкторско-технологического анализа надёжности полезно в случае разработки новой техники или в условиях нарушения связи поколений конструкторов, поскольку позволяет достигнуть дополнительных возможностей и преимуществ по сравнению с известными видами анализов, а именно:

1) является анализом, который не подменяет существующие анализы надёжности, но обобщает и подытоживает их;

2) даёт возможность повысить достоверность расчётов, проводимых в обеспечение надёжности за счёт использования процедур по установлению соответствия между принятыми при анализах и расчётах допущениями и фактическим конструкторским и технологическим исполнением объектов;

3) позволяет планировать на системной основе и проводить те виды расчётов и испытаний, которые необходимы для обеспечения заданной надёжности;

4) предоставляет возможность сократить финансовые затраты на изготовление изделий из-за проектных ошибок;

5) делает возможным прогнозировать и превентивно предотвращать условия возникновения возможных причин отказов на ранних стадиях разработки;

6) алгоритмизирует (формализует) процесс конструирования и тем самым снижает трудоёмкость проведения конструкторских работ;

7) создаёт условия для обучения молодых специалистов рациональным методам конструирования с заданными свойствами надёжности;

8) выявляет конструкторские и технологические факторы ненадёжности анализируемых объектов, которые невозможно обнаружить никакими другими видами анализов;

9) обеспечивает заданную безотказность за счёт принятия конструкторско-технологических решений на системной основе;

10) служит эффективным средством верификации надёжности, поскольку при анализах объясняется не только необходимость установления требований к надёжности, но и причины их появления.

Наконец, методы конструкторско-технологического анализа и обеспечения надёжности являются теми немногими методами, если не единственными, способными реально свести к минимуму количество отказов на практике и при этом в какой-то степени развенчать устоявшееся мнение о том, что *«надёжность требует значительных материальных затрат»*. Вероятнее всего, надёжность требует глубоких политехнических знаний и умений ими пользоваться, а для этого действительно необходимы значительные финансовые и материальные затраты на образование и науку.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ллойд Д.К., Липов М. Надёжность: организация исследования, методы, математический аппарат / под ред. Н.В. Бусленко. – М.: Сов. радио, 1964. – 686 с.
2. Коваленко И.Н., Кузнецов Н.Ю. Методы расчёта высоконадёжных систем. – М.: Радио и связь, 1988. – 176 с.
3. Половко А.М., Гуров С.В. Основы теории надёжности. – СПб.: БХВ-Петербург, 2006. – 704 с.
4. Ушаков И.А. Надёжность: прошлое, настоящее, будущее: пленарный доклад на открытии конференции «Математические методы в надёжности» (MMR–2000), Бордо, Франция, 2000 // Надёжность: Вопросы теории и практики (Reliability: Theory & Applications). – 2006. – № 1. – С. 17–27.
5. Похабов Ю.П., Ушаков И.А. О безаварийности функционирования уникальных высокоответственных систем // Методы менеджмента качества. – 2014. – № 11. – С. 50–56.
6. Адамс Д. В основном безвредна. – М.: АСТ; Ермак, 2003. – 269 с.
7. Ушаков И.А. Надёжность – мой компас земной, а удача награда за смелость. Human factors in reliability или Неформальная история теории надёжности [Электронный ресурс] // Gnedenko e-Forum: International Group on Reliability. – Режим доступа: <http://gnedenko-forum.org/history.htm> (31.10.2017).
8. Гудилин В.Е., Слабкий Л.И. Ракетно-космические системы (История. Развитие. Перспективы). – М., 1996. – 326 с.
9. События в околоземном космическом пространстве. – Королёв: ЦНИИмаш, 2016. – Вып. 6. – 46 с.
10. Болотин В.В. Теория надёжности механических систем с конечным числом степеней свободы // Изв. АН СССР. Механика твёрдого тела. – 1969. – № 5. – С. 74–81.
11. Болотин В.В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций. – М.: Машиностроение, 1984. – 312 с.
12. Проников А.С. Параметрическая надёжность машин. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 560 с.
13. Проников А.С. Надёжность машин. – М.: Машиностроение, 1978. – 592 с.
14. Кузнецов А.А. Надёжность конструкции баллистических ракет. – М.: Машиностроение, 1978. – 256 с.
15. Кузнецов А.А., Золотов А.А., Комягин В.А. и др. Надёжность механических частей конструкции летательных аппаратов. – М.: Машиностроение, 1979. – 144 с.

16. Уёмов А.И. Вещи, свойства и отношения. – М.: Изд-во АН СССР, 1963. – 184 с.
17. ОТ.МКБ.145–15. Разработка конструкторско-технологического обеспечения безотказности функционирования замка. Арх. № ОТ-МКБ-0017–15. – Железногорск: ОАО «НПО ПМ МКБ», 2015. – 103 с.
18. ОТ.МКБ.148/507–15. Разработка алгоритмов и методов конструкторско-технологического обеспечения надёжности оборудования на примере муфты цементировочной. Арх. № ОТ-МКБ-0018–15. – Железногорск: ОАО «НПО ПМ МКБ», 2015. – 90 с.
19. 527-ОТ-МКБ-0023–16. Анализ надёжности механических устройств раскрытия панелей солнечной батареи малого космического аппарата НТ-100 с применением методов конструкторско-технологического обеспечения. Арх. № МКБ-0023–16. – Железногорск: ОАО «НПО ПМ МКБ», 2016. – 51 с.
20. 527-ОТ-МКБ-0024–16. Разработка алгоритмов и методов конструкторско-технологического обеспечения надёжности стержневых трансформируемых конструкций на примере стержневой конструкции штанги антенны № 1. Арх. № МКБ-0024–16. – Железногорск: ОАО «НПО ПМ МКБ», 2016. – 155 с.
21. 218.ОТ.МКБ.202–16. Анализ отказоспособности устройства спускового и замка. Арх. № 531-ОТ-МКБ-0028–16. – Железногорск: ОАО «НПО ПМ МКБ», 2016. – 64 с.
22. Кукушкин С.Г., Петяева Н.Н., Двирный В.В. Особенности понятийного аппарата профессионального перевода на примере крупногабаритных трансформируемых конструкций космического аппарата // Решетнёвские чтения [Электронный ресурс]: материалы XXI Междунар. науч.-практ. конф., посвящённой памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М.Ф. Решетнёва (8–11 нояб. 2017, г. Красноярск): в 2 ч. / под общ. ред. Ю.Ю. Логинова. Электрон. текстовые дан. (1 файл: 24,75 МБ). – Красноярск, 2017. – Ч. 1. – С. 138–139. – Режим доступа: <https://reshetnev.sibsau.ru/page/materialy-konferentsii> (10.11.2017).
23. ГОСТ В 25613–83. Процессы разделения и отделения в ракетно-космической технике. Термины и определения. – М.: Изд-во стандартов, 1984. – 7 с.
24. Медзмариашвили Э.В. Трансформируемые конструкции в космосе и на земле. – Тбилиси: Самшобло, 1995. – 446 с.
25. Разработки систем космических аппаратов / под ред. П. Фортескью, Г. Суайнерда, Д. Сиарка. – М.: Альпина Паблишер, 2015. – 765 с.
26. Space Vehicle Mechanisms – Elements of Successful Design, Edited by Peter L. Conley. – NJ.: John Wiley & Sons, 1998. – 794 p.

27. Imbriale W. *Spaceborne Antennas for Planetary Exploration*. – NJ.: John Wiley & Sons, 2006. – 592 p.
28. Шатров А.К., Назарова Л.П., Машуков А.В. Механические устройства космических аппаратов. Конструктивные решения и динамические характеристики. – Красноярск: СибГАУ, 2006. – 84 с.
29. Шатров А.К., Назарова Л.П., Машуков А.В. Основы конструирования механических устройств космических аппаратов. Конструктивные решения, динамические характеристики. – Красноярск: СибГАУ, 2009. – 144 с.
30. Романов А.В., Тестоедов Н.А. Основы проектирования информационно-управляющих и механических систем космических аппаратов. – СПб.: Проффессионал, 2015. – 240 с.
31. Круглов Г.Е. Аналитическое проектирование механических систем. – Самара: СГАУ, 2001. – 132 с.
32. Зимин В.Н., Борзых С.В. Механика трансформируемых крупногабаритных космических конструкций: в 2-х ч. Ч. 1: Солнечные батареи космических аппаратов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. – 67 с.
33. Солнечные батареи автоматических космических аппаратов (компоновка на КА, конструкция узлов, проектировочные расчёты) / К.В. Безручко, В.Ф. Гайдуков, С.В. Губин и др. – Харьков: ХАИ, 2011. – 276 с.
34. Куренков В.И., Капитонов В.А. Методы расчёта и обеспечения надёжности ракетно-космических комплексов. – Самара: Изд-во СГАУ, 2007. – 320 с.
35. Tibert G. *Deployable Tensegrity Structures for Space Applications: Doctoral Thesis*. – Stockholm, 2002. – 244 p.
36. Гутовский И.Е. Метод решения основных задач проектирования раскрывающихся конструкций космических аппаратов на базе математического моделирования: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.02. – СПб., 2006. – 156 с.
37. Зимин В.Н. Разработка методов анализа динамики и оценки работоспособности раскрывающихся крупногабаритных космических конструкций ферменного типа: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 01.02.06, 05.07.02. – М., 2008. – 34 с.
38. Похабов Ю.П. Конструкторско-технологическое обеспечение безотказности трансформирования механических устройств одноразового срабатывания космических аппаратов: дис. ... канд. техн. наук: 05.07.02. – Красноярск, 2013. – 173 с.
39. ОСТ 92-4339–80. Механизмы раскрытия и фиксации элементов конструкций. Общие технические требования. Методы контроля и испытаний. – М.: Изд-во стандартов. – 25 с.
40. Military Standard. *Assemblies, Moving Mechanical, for Space and Launch Vehicles, General Specification for (01 Feb 1988)*. MIL-A-83577B (USAF). – 70 p.

41. ECSS Standard. Space engineering, Mechanical – Part 3: Mechanisms (25 April 2000). ECSS Secretariat, ESA ECSS-E-30 Part 3A. – 66 p.
42. ECSS Standard. Space engineering, Mechanisms (6 March 2009). ECSS Secretariat, ESA ECSS-E-ST-33-01C. – 65 p.
43. AIAA Standard. Moving Mechanical Assemblies for Space and Launch Vehicles (Month 2005). AIAA S-114-2005. – 39 p.
44. NASA Standard. Design and Development Requirements for Mechanisms (13 June 2006). NASA-STD-5017. – 30 p.
45. Мощным спутникам – мощные батареи // Сибирский спутник. – 2012. – № 19. – С. 2.
46. Козлов А.Г., Бартенев В.А., Ромашко А.В. и др. Космические аппараты связи и навигации Научно-производственного объединения прикладной механики на пороге XXI века // Решетнёвские чтения: доклады на пленарном заседании III Всерос. науч.-практ. конф. (10–12 ноября, 1999, г. Красноярск). – Красноярск: САА, 1999. – С. 25–44.
47. Отраслевой центр [Электронный ресурс] // АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнёва»: сайт. – Режим доступа: <https://www.iss-reshetnev.ru/branch-center> (31.10.2017).
48. Толковый словарь русского языка: в 4 т. Т. 3 / под ред. Д. Ушакова. – М.: ТЕРРА, 1996. – 712 с.
49. Космическая индустрия / В.С. Авдеевский, Г.Р. Успенский. – М.: Машиностроение, 1989. – 568 с.
50. Приоритетное направление отдано НПО ПМ [Электронный ресурс] // АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнёва»: сайт. – Режим доступа: <https://www.iss-reshetnev.ru/media/news/news-240806> (31.10.2017).
51. Гряник М.В., Ломан В.И. Развёртываемые зеркальные антенны зонтичного типа. – М.: Радио и связь, 1987. – 72 с.
52. Агапов В. USA-171: новое «ухо» на орбите // Новости космонавтики. – 2003. – Т. 13, № 11. – С. 28–34.
53. ГОСТ 25645.103–84. Условия физические космического пространства. Термины и определения. – М.: Изд-во стандартов, 1984. – 6 с.
54. Берг А.И. Избранные труды. – М.–Л.: Энергия, 1964. – 224 с.
55. Апполонов И.В., Северцев Н.А. Надёжность невосстанавливаемых систем однократного применения. – М.: Машиностроение, 1977. – 212 с.
56. Диняева Н.С. Конструирование механизмов антенн. – М.: Изд-во МАИ, 2002. – 340 с.
57. Похабов Ю.П. Особенности обеспечения безотказности функционирования механических устройств одноразового срабатывания на космических аппаратах // Вестник СибГАУ. – 2012. – № 2. – С. 96–100.

58. Кузнецов В.В., Ереско С.П. Устройство удержания и освобождения подвижных элементов конструкции космического аппарата с пониженным ударным воздействием // Актуальные проблемы авиации и космонавтики: материалы XI Всерос. науч.-практ. конф. Т. 1. Технические науки. Информационные технологии. – Красноярск, СибГАУ, 2015. – Т. 1. – С. 208–210.

59. Пат. 1818282 Российская Федерация. МПК В64G 1/44. Устройство для фиксации навесных конструкций спутника / Похабов Ю.П., Маслов А.Ф. / заявитель и патентообладатель НПО прикладной механики. – № 4892000/23; заявл. 19.12.1990; опубл. 30.05.1993. Бюл. № 20.

60. Пат. 2046079 Российская Федерация. МПК В 64G 1/22, 1/44. Держатель / Похабов Ю.П., Наговицин В.Н., Шугалей А.Г. / заявитель и патентообладатель НПО прикладной механики. – № 92007815/23; заявл. 24.11.1992; опубл. 20.10.1995. Бюл. № 29.

61. Пат. 2121947 Российская Федерация. МПК В 64G 1/22, 1/44. Держатель / Похабов Ю.П., Арапочкин А.Н., Храмов Е.Н. и др. / заявитель и патентообладатель НПО прикладной механики. – № 95100367/28; заявл. 11.01.1995; опубл. 20.11.1998. Бюл. № 32.

62. Пат. 2005651 Российская Федерация. МПК В64С 1/40. Устройство для крепления пакета панелей на спутнике: / Похабов Ю.П., Маслов А.Ф., Лесихин В.В. и др. / заявитель и патентообладатель НПО прикладной механики. – № 4939318/23; заявл. 28.05.1991; опубл. 15.01.1994. Бюл. № 1.

63. Пат. 2130880 Российская Федерация. МПК В64G 1/22, 1/44. Способ удержания объектов и устройство для его реализации / Лесихин В.В., Похабов Ю.П., Халиманович В.И. и др. / заявитель и патентообладатель НПО прикладной механики. – № 93010565/28; заявл. 01.03.1993; опубл. 27.05.1999. Бюл. № 15.

64. Пат. 2198117 Российская Федерация. МПК В64G 1/00, 1/44. Летательный аппарат / Похабов Ю.П., Наговицин В.Н., Лесихин В.В. и др. / заявитель и патентообладатель НПО прикладной механики им. акад. М.Ф. Решетнёва. – № 99102342/28; заявл. 08.02.1999; опубл. 10.02.2003. Бюл. № 4.

65. Пат. 2250863 Российская Федерация. МПК В64G 1/22, 1/64, F16B 9/02. Устройство фиксации шарнирного узла / Похабов Ю.П., Наговицин В.Н., Богданов В.Д. / заявитель и патентообладатель НПО прикладной механики им. акад. М.Ф. Решетнёва. – № 2003112579/11; заявл. 28.04.2003; опубл. 27.04.2005. Бюл. № 12.

66. Пат. 2142584 Российская Федерация. МПК F16F 1/14. Торсион / Похабов Ю.П., Лесихин В.В. / заявитель и патентообладатель НПО прикладной механики. – № 95105410/28; заявл. 10.04.1995; опубл. 10.12.1999. Бюл. № 34.

67. Крылов А.В., Чурилин С.А. Моделирование раскрытия солнечных батарей различных конфигураций // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». – 2011. – № 1. – С. 106–112.

68. Пат. 2123875 Российская Федерация. МПК В64G 1/44. Способ развёртывания многосекционных конструкций и многосекционная конструкция для его реализации / Похабов Ю.П., Лесихин В.В. / заявитель и патентообладатель НПО прикладной механики. – № 93010565/23; заявл. 01.03.1993; опубл. 27.12.1998. Бюл. № 36.

69. Моисеев П.П., Викторов А.И. Управляемый спусковой механизм для раскрытия конструкций космического аппарата // Решетнёвские чтения: матер. XX Юбилейной междунар. науч. конф., посвящённая памяти генер. конструктора ракетно-космических систем акад. М.Ф. Решетнёва (9–12 ноября 2016, г. Красноярск). – Красноярск: СибГАУ, 2016. – Ч. 1. – С. 141–142.

70. Пат. 2586445 Российская Федерация. МПК G 01M 13/02. Способ контроля запаса движущего момента в шарнирных устройствах крупногабаритных механических систем космических аппаратов над моментами сопротивлений / Байбородов А.А., Кузнецов В.В., Кузоро В.И. / заявитель и патентообладатель ОАО «Информационные спутниковые системы» им. акад. М.Ф. Решетнёва». – № 2014143506/28; заявл. 29.10.2014; опубл. 10.06.2016. Бюл. № 16.

71. Военно-авиационный словарь / П.Ф. Березин, Г.С. Васильков, В.П. Гарцев и др. – М.: Воениздат, 1966. – 472 с.

72. ОСТ 1 10173–71. Оболочки боуденовские. Конструкция и размеры. – М.: Изд-во стандартов, 1971. – 2 с.

73. J.H. Saleh & J.-F. Caster. Reliability and Multi-State Failures: A Statistical Approach, First Edition. – NJ.: John Wiley & Sons, 2011. – 206 p.

74. Цыганков О. Зачем нужны андройды в космосе: [интервью с д-р. техн. наук, глав. науч. сотрудником РКК «Энергия», акад. Российской акад. космонавтики им. К.Э. Циолковского / записал Николай Дорожкин] // Независимая газ. – 2013. – 25 дек. Прил.: С. 10. (НГ-Наука; № 17).

75. Горбенко А.В., Засуха С.А., Рубан В.И. и др. Безопасность ракетно-космической техники и надёжность компьютерных систем: 2000–2009 гг. // Авиационно-космическая техника и технология. – 2011. – № 1. – С. 9–20.

76. «Даурия Аэроспейс» ищет причины нештатной ситуации со спутниками МКА-Н [Электронный ресурс] // Dauria Aerospace: сайт. – Режим доступа: <http://www.dauria.ru/news/dauria-ishchet-mka-n> (31.10.2017).

77. Запуски: база данных [Электронный ресурс] // Ракеты-носители, спутники, самолёты, приборы: сайт. – Режим доступа: <http://ecoruspace.me/> (31.10.2017).

78. ГОСТ Р 53802–2010 Системы и комплексы космические. Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2011. – 32 с., разд. паг.

79. Патраев В.Е. Методы обеспечения и оценки надёжности космических аппаратов с длительным сроком активного существования. – Красноярск: СибГАУ, 2010. – 136 с.
80. Космические вехи: сб. науч. тр., посвященный 50-летию создания ОАО «ИСС» им. академика М.Ф. Решетнёва». – Красноярск: ИП Суховольская Ю.П., 2009. – 704 с.
81. Тимашев С.А. Инфраструктуры: в 2-х т. Т. 1. Надёжность и долговечность. – Екатеринбург: Изд-во НИСО УрО РАН, 2016. – 530 с.
82. ГОСТ 27.002–89. Надёжность в технике. Основные понятия. Термины и определения. – М.: Изд-во стандартов, 1990. – 37 с.
83. ГОСТ 27.002–2015. Надёжность в технике. Термины и определения. – М.: Стандартиформ, 2016. – 28 с.
84. Клиффорд М. Справочник инженера. Инженерная механика. – М.: Изд-во АСВ, 2003. – 280 с.
85. ГОСТ Р 51901.10–2009. Менеджмент риска. Процедуры управления пожарным риском на предприятии. – М.: Стандартиформ, 2010. – 24 с.
86. ДБН В.1.2-14–2009. Система обеспечения надёжности и безопасности строительных объектов. Общие принципы обеспечения надёжности и конструктивной безопасности зданий, сооружений строительных конструкций и оснований. – Киев: Минрегионстрой Украины, 2009. – 42 с.
87. Принципы Форда / И.В. Рабчинский. – М.: Гос. техн. изд-во, 1924. – 24 с.
88. ГОСТ 27.004–85. Надёжность в технике. Системы технологические. Термины и определения. – Минск: Госстандарт, 2009. – 13 с.
89. Диллон Б., Сингх Ч. Инженерные методы обеспечения надёжности систем. – М.: Мир, 1984. – 318 с.
90. ГОСТ Р 56514–2015. Нормы прочности автоматических космических аппаратов. – М.: Стандартиформ, 2015. – 27 с., разд. паг.
91. Postma R.W. Force and torque margins for complex mechanical systems / Proceedings of the 37th Aerospace Mechanisms Symposium, Johnson Space Flight Center, May 19–21, 2004. – P. 107–118.
92. Афанасьев В.Г., Верхотуров В.И., Заславский В.А. и др. Проектирование надёжных спутников связи / под ред. акад. М.Ф. Решетнёва. – Томск: МНП «РАСКО», 1993. – 221 с.
93. ГОСТ 33707–2016. Информационные технологии. Словарь. – М.: Стандартиформ, 2016. – 205 с., разд. паг.
94. Reason J. Human Error. – Cambridge: University Press, 1990. – 302 p.
95. Похабов Ю.П. Обеспечение надёжности уникальных высокоответственных систем // Надёжность. – 2017. – Т. 17, № 3. – С. 17–23.

96. Таблицы для анализа и контроля надёжности / Я.Б. Шор, Ф.И. Кузьмин. – М.: Сов. радио, 1968. – 268 с.
97. Пат. 2198387 Российская Федерация. МПК G 01L 3/00, 5/00. Способ выбора привода для поворота конструкции в шарнирном узле / Похабов Ю.П. / заявитель и патентообладатель НПО прикладной механики им. акад. М.Ф. Решетнёва. – № 2000129330/28; заявл. 23.11.2000; опубл. 10.02.2003. Бюл. № 4.
98. ГОСТ 3635–78. Подшипники шарнирные. Технические условия. – М.: Изд-во стандартов, 1978. – 27 с.
99. ОСТ 92-4556–85. Покрытия твёрдые смазочные. Технические требования и типовые технологически процессы. – М.: Изд-во стандартов, 1985.
100. Хопин П.Н. Комплексная оценка работоспособности пар трения с твёрдосмазочными покрытиями в различных условиях функционирования. – М.: МАТИ, 2012. – 256 с.
101. ATR-2009(9369)-1. Critical Clearances in Space Vehicles / Brian W. Gore. The Aerospace Corporation. – 2008. – 31 October. – 41 p.
102. ГОСТ Р 57188–2016. Численное моделирование физических процессов. Термины и определения. – М.: Стандартиформ, 2016. – 12 с., разд. паг.
103. ГОСТ 22487–77. Проектирование автоматизированное. Термины и определения. – М.: Изд-во стандартов, 1978. – 12 с.
104. Надёжность и эффективность в технике: справочник: в 10 т. / ред. совет: В.С. Авдуревский и др. – М.: Машиностроение, 1986. – Т. 1: Методология. Организация. Терминология / под ред. А.И. Рембезы. – 224 с.
105. Философский энциклопедический словарь / гл. ред.: Л.Ф. Ильичев, П.Н. Федосеев, С.М. Ковалёв, В.Г. Панов. – М.: Сов. энциклопедия, 1983. – 840 с.
106. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. – М.: Наука, 1969. – 576 с.
107. Зленко М.А. Аддитивные технологии в машиностроении / М.В. Нагайцев, В.М. Довбыш. – М.: ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», 2015. – 220 с.
108. ГОСТ 2.103–2013. Единая система конструкторской документации. Стадии разработки. – М.: Стандартиформ, 2015. – 9 с., разд. паг.
109. Арасланов А.М. Расчёт элементов конструкций заданной надёжности при случайных воздействиях. – М.: Машиностроение, 1987. – 128 с.
110. Никольский В.В. Основы проектирования автоматических космических аппаратов. – СПб.: БГТУ, 2007. – 230 с.
111. Богданов А.А. Тектология: Всеобщая организационная наука: в 2-х кн. – М.: Экономика, 1989. – Кн. 1. – 304 с.
112. Заславський В.А. Принцип різнотипності та особливості дослідження складних систем з високою ціною відмови // Вісник

Київського університету. Серія: Фізико-математичні науки. – 2006. – № 1. – С. 136–147.

113. Тимошенко С.П., Симонов Б.М., Горошко В.Н. Основы теории надёжности. – М.: Юрайт, 2015. – 445 с.

114. Зимин В.Н. Механика трансформируемых структурных космических конструкций // Вестник СамГУ. Естественнонаучная серия. – 2007. – № 4. – С. 105–114.

115. Лернер Э.Дж. Альтернатива «запуску на авось» // Аэрокосмическая техника. – 1987. – № 9. – С. 157–160.

116. Тестоедов Н.А., Михнёв М.М., Михеев А.Е. и др. Технология производства космических аппаратов. – Красноярск: СибГАУ, 2009. – 349 с.

117. Дайджест космических новостей МКК. – 2012. – № 243. – С. 16–17 [Электронный ресурс] // Институт космической политики: хостинг. – Режим доступа: <http://ispolicy.ru/news/digest/> (31.10.2017).

118. Роскосмос объяснил ЧП с «Прогрессом»: антенна не открылась из-за клея в механизме [Электронный ресурс] // NEWru.com: сайт. – Режим доступа: <http://newsru.com/russia/14may2013/progress.html> (31.10.2017).

119. Солнечная батарея спутника раскрылась раньше, чем нужно, и зацепилась за конструкцию аппарата [Электронный ресурс] // Новости ВПК: сайт. – Режим доступа: https://vpk.name/news/156505_roskosmos_ustanovil_prichinyi_neshtatnoi_situacii_s_resursomp.html (31.10.2017).

120. Развитие организационных и методологических аспектов теории и практики расследования причин происшествий на объектах ракетной, ракетно-космической и авиационной техники / под общ. ред. А.Г. Мильковского. – Королёв: ФГУП ЦНИИмаш, 2015. – 334 с.

121. Н. Hecht & М. Hecht. Reliability prediction for spacecraft, Report prepared for Rome Air Development Center, no. RADC-TR-85-229, Dec. – 1985. – 156 p.

122. Туманов А.В., Зеленцов В.В., Щеглов Г.А. Основы компоновки бортового оборудования космических аппаратов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. – 344 с.

123. Барт Т.В. Управление качеством. – М.: Изд-во МИЭМП, 2010. – 256 с.

124. Бушуев В.В. Практика конструирования машин: справочник. – М.: Машиностроение, 2006. – 448 с.

125. Солодкая М.С. Надёжность, эффективность, качество систем управления // Credo. Теоретический философский журнал. – 1999. – № 5. – С. 18–32.

126. Стратегии бизнеса: Аналитический справочник. Айвазян С.А., Балкинд О.Я., Баснина Т.Д. и др. / под ред. Г.Б. Клейнера. – М.: КОНСЭКО, 1998. – 348 с.

127. Сорин Я.М. Физическая сущность надёжности. – М.: Изд-во стандартов, 1969. – 77 с.

128. China Airlines Downstop Failure Animation [Электронный ресурс] // YouTube: видеохостинг. – Режим доступа: <https://www.youtube.com/watch?v=xSUNzpmE-Rk> (31.10.2017).

129. Козлов Б.А., Ушаков И.А. Справочник по расчету надёжности радиоэлектроники и автоматики. – М.: Сов. радио, 1975. – 472 с.

130. Шпер В.Л. Реферативный аналитический обзор наиболее значимых публикаций в отечественной и зарубежной периодике по вопросам оценки надёжности продукции, в том числе об опыте предприятий // Надёжность: вопросы теории и практики (Reliability: Theory & Applications). – 2006. – № 3. – С. 106–119.

131. Шпер В.Л. Реферативный аналитический обзор наиболее значимых публикаций в отечественной и зарубежной периодике по вопросам оценки надёжности продукции, в том числе об опыте предприятий (продолжение) // Надёжность: вопросы теории и практики (Reliability: Theory & Applications). – 2006. – № 4. – С. 106–119.

132. Шпер В.Л. Проблемы надёжности продукции в отечественной и зарубежной периодике // Методы менеджмента качества. – 2007. – № 12. – С. 44–47.

133. Апполонов И.В., Кухаренко А.А., Дадашев М.Н. и др. Анализ основных работ по надёжности, выполненных в СССР, и основные задачи на ближайшую перспективу XXI века // Оборонный комплекс – научно-техническому прогрессу России. – 2006. – № 2. – С. 88–100.

134. Основы теории надёжности и диагностика / Н.Я. Яхьяев, А.В. Кораблин. – М.: Академия, 2009. – 256 с.

135. Меламедов И.М. Физические основы надёжности. – Л.: Энергия, 1970. – 152 с.

136. Ван-Желен В. Физическая теория надёжности. – Симферополь: Крым, 1998. – 318 с.

137. Завистовский В.Э., Холодилов О.В., Богданович П.Н. Физика отказов механических систем. – Минск: Технопринт, 1999. – 212 с.

138. Сугак Е. Надёжность техники. Ч. 1. Теоретические основы. – Saarbrücken: LAP Lambert Academic Publishing GmbH & Co, 2014. – 408 с.

139. Богданович В.И. Теоретические основы обеспечения надёжности летательных аппаратов на стадии их производства. – Самара: Изд-во СГАУ, 2007. – 90 с.

140. Нетес В.А., Тарасьев Ю.И., Шпер В.Л. Как нам определить что такое «надёжность» // Надёжность. – 2014. – № 4. – С. 3–14.

141. ГОСТ 25866–83. Эксплуатация техники. Термины и определения. – М.: Изд-во стандартов, 1983. – 9 с.

142. Гнеденко Б.В. О статистических методах и теории надёжности / Основные вопросы надёжности и долговечности машин. – М.: МАТИ, 1969. – С. 22–42.

143. Пат. 2111155 Российская Федерация. МПК В64G 1/22, 1/44 Устройство блокировки и освобождения элементов раскрывающегося типа / Похабов Ю.П., Арапочкин А.Н., Наговицин В.Н. / заявитель и патентообладатель НПО прикладной механики. – № 95100368/11; заявл. 11.01.1995; опубл. 20.05.1998. Бюл. № 14.

144. ОСТ 92-9594–82. Пирозамки. Методика расчёта. – М.: Изд-во стандартов, 1982. – 24 с.

145. ГОСТ Р 27.003–2011. Надёжность в технике. Управление надёжностью. Руководство по заданию технических требований к надёжности. – М.: Стандартинформ, 2013. – 20 с., разд. паг.

146. Марка Д.А., МакГоуэн К. Методология структурного анализа и проектирования SADT. – М.: Метатехнология, 1993. – 240 с.

147. Уткин Л.В. Анализ риска и принятие решений при неполной информации. – СПб.: Наука, 2007. – 404 с.

148. ГОСТ 2.102–2013. Единая система конструкторской документации. Виды и комплектность конструкторских документов. – М.: Стандартинформ, 2014. – 16 с., разд. паг.

149. Талёб Н.Н. Чёрный лебедь. Под знаком непредсказуемости. – М.: КоЛибри, 2009. – 528 с.

150. P50-54-82–88. Рекомендации. Надёжность в технике. Выбор способов и методов резервирования. – М., 1988. – 94 с.

151. Основы проектирования космических аппаратов информационного обеспечения / В.Е. Чеботарёв, В.Е. Косенко. – Красноярск: СибГАУ, 2011. – 488 с.

152. ОПБ-88/97. Общие положения обеспечения безопасности атомных станций // Ядерная и радиационная безопасность. – 2015. – № 2. Прил. 4.

153. Мехоношин В.С. Надёжность технических систем и техногенный риск. – Ульяновск: УВАУ ГА, 2005. – 82 с.

154. Терминология строительной механики. Вып. 5. – М.–Л.: Изд-во АН СССР, 1947. – 50 с.

155. Пат. 2230945 Российская Федерация. МПК F16B 1/00. Способ закрепления изделий / Похабов Ю.П., Гриневиц В.В. / заявитель и патентообладатель НПО прикладной механики им. акад. М.Ф. Решетнёва. – № 2002113143/11; заявл. 18.05.2002; опубл. 20.06.2004. Бюл. № 17.

156. Пат. 2263827 Российская Федерация. МПК F16B 5/02. Болтовое соединение деталей из материалов с разными коэффициентами теплового расширения / Похабов Ю.П., Наговицин В.Н. / заявитель и патентообладатель

тель НПО прикладной механики им. акад. М.Ф. Решетнёва. – № 2003112578/11; заявл. 28.04.2003; опубл. 20.10.2004. Бюл. № 31.

157. Доронин С.В., Похабов Ю.П. Повышение достоверности оценок прочности конструкций технических объектов // Вестник машиностроения. – 2013. – № 6. – С. 85–88.

158. Пат. 2125528 Российская Федерация. МПК В64G 1/44. Способ закрепления изделий статически неопределимой системой связей / Похабов Ю.П., Наговицин В.Н. / заявитель и патентообладатель НПО прикладной механики. – № 5067373/28; заявл. 29.09.1992; опубл. 27.01.1999. Бюл. № 3.

159. Пат. 2131068 Российская Федерация. МПК F16B 5/02, В64G 1/22, 1/44. Болтовое соединение деталей / Похабов Ю.П., Наговицин В.Н. / заявитель и патентообладатель НПО прикладной механики. – № 95100399/28; заявл. 11.01.1995; опубл. 27.05.1999. Бюл. № 15.

160. Пат. 2251031 Российская Федерация. МПК F16B 5/02. Болтовое соединение деталей / Похабов Ю.П., Наговицин В.Н. / заявитель и патентообладатель НПО прикладной механики им. акад. М.Ф. Решетнёва. – № 2003112525/11; заявл. 28.04.2003; опубл. 27.04.2005. Бюл. № 12.

161. Тарг С.М. Краткий курс теоретической механики. – М.: Высш. шк., 1986. – 416 с.

162. Пат. 3240327 ФРГ. МПК В64G 1/44, H01L 31/04. Электрическое соединение между панелями солнечного генератора для искусственных спутников Земли. – № 3240327; опубл. 03.05.1984. Бюл. № 18.

163. Усаковский С.Б. С какой точностью вести расчёты прочности сооружений. – Киев: КНУСА, 2005. – 160 с.

164. Кудрявцев И.В., Наумченков Н.Е. Усталость сварных конструкций. – М.: Машиностроение, 1976. – 270 с.

165. Чеботарёв В.Е. Проектирование космических аппаратов систем информационного обеспечения: в 2-х кн. Кн. 2. Внутреннее проектирование космического аппарата. – Красноярск: СибГАУ, 2005. – 168 с.

166. Куриленко А.М., Ледовский А.Д. Качество судовых динамических систем правления. – СПб.: Судостроение, 1994. – 176 с.

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

168. Назаров А.В., Лоскутов А.И. Нейросетевые алгоритмы прогнозирования и оптимизации систем. – СПб.: Наука и техника, 2003. – 384 с.

169. Разработка научно-методической базы и технологий обеспечения качества, надёжности и безопасности металлокомпозитных баков высокого давления для перспективных электрореактивных двигателей космических аппаратов. Отчёт о прикладных научных исследованиях, номер государственной регистрации в ЦИТиС: 115011270003, 2014-2016 гг. (этап

№ 1. – Красноярск: СКТБ «Наука» КНЦ СО РАН, 2014. – 167 с.; этап № 2. – Красноярск: СКТБ «Наука» КНЦ СО РАН, 2015. – 226 с.; этап № 3. – Красноярск: СКТБ «Наука» КНЦ СО РАН, 2015. – 169 с.; этап № 4. – Красноярск: ФИЦ КНЦ СО РАН, 2016. – 203 с.; этап № 5. – Красноярск: ФИЦ КНЦ СО РАН, 2016. – 53 с.)

170. Пат. 2190900 Российская Федерация. МПК Н 01L 31/042. Панель солнечной батареи / Похабов Ю.П., Кузоро В.И., Лесихин В.В. и др. / заявитель и патентообладатель НПО прикладной механики им. акад. М.Ф. Решетнёва. – № 99127954/28; заявл. 31.12.1999; опубл. 10.10.2002. Бюл. № 28.

171. Пат. 2220477 Российская Федерация. МПК Н01L 31/042. Панель солнечной батареи / Бабич Ю.Г., Битков В.А., Кузоро В.И. и др. / заявитель и патентообладатель НПО прикладной механики им. акад. М.Ф. Решетнёва. – № 2002107006/28; заявл. 18.03.2002; опубл. 27.12.2003. Бюл. № 36.

172. К аварии ракеты «Протон-М» привела неправильная установка датчиков угловых скоростей [Электронный ресурс] // Вестник ГЛОНАСС: сайт межотраслевого журнала навигационных технологий. – Режим доступа: http://vestnik-glonass.ru/news/vo_vlasti/k_avarii_rakety_proton_m_privela_neppravilnaya_ustanovka_datchikov_uglovykh_skorostey/ (31.10.2017).

173. ГОСТ 26883–86. Внешние воздействующие факторы. Термины и определения. – М.: Изд-во стандартов, 1989. – 9 с.

174. Модель космоса: в 2 т. / под ред. М.И. Панасюка, Л.С. Новикова. Т. 2: Воздействие космической среды на материалы и оборудование космических аппаратов. – М.: КДУ, 2007. – 1144 с.

175. Соустин Б.П., Тестоедов Н.А., Рудомёткин А.Г. и др. Виброиспытания космических аппаратов. – М.: Наука, 2000. – 171 с.

176. Kiselev A.I., Nedaivoda A.I., Trafton W.S. et al. Proton Launch Vehicle Mission Planner's Guide – Issue 1, Revision 4, March 1, 1999. – 379 p.

177. Справочник по сопротивлению материалов / Г.С. Писаренко, А.П. Яковлев, В.В. Матвеев; отв. ред. Г.С. Писаренко – Киев: Наук. думка, 1988. – 736 с.

178. Похабов Ю.П. О философическом аспекте надёжности на примерах уникальных высокоответственных систем // Надёжность. – 2015. – № 3. – С. 16–27.

179. Об утверждении положения о единицах величин, допускаемых к применению в РФ / Постановление Правительства РФ от 31.10.2009. № 879. – М., 2009.

180. Гнеденко Б.В., Беляев Ю.К., Соловьёв А.Д. Математические методы в теории надёжности. Основные характеристики надёжности и их статистический анализ. – М.: Наука, 1965. – 524 с.

181. ISO 8402:1994. Управление качеством и обеспечение качества: словарь. – М.: ВНИИС, 1994.

182. ГОСТ Р 51814.3–2001. Системы качества в автомобилестроении. Методы статистического управления процессами. – М.: Стандартиформ, 2006. – 36 с., разд. паг.

183. ГОСТ Р 51901.14–2005. Менеджмент риска. Метод структурной схемы надёжности. – М.: Стандартиформ, 2005. – 18 с., разд. паг.

184. ДСТУ 2860-94. Надійність техніки. Терміни та визначення : чинний від 1996-01-01. Офіц. вид. – Київ: Держстандарт України, 1995. – 92 с.

185. Проничев Н.Д. Технологические методы обеспечения надёжности двигателей летательных аппаратов [Электронный ресурс]: электрон. учеб. пособие / Н.Д. Проничев, А.П. Шулепов. Самара, 2011. 1 эл. опт. диск (CD-ROM). Минобрнауки России, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королёва (нац. исслед. ун-т). Электрон. текстовые и граф. дан. (7,59 Мбайт).

186. Горн И.А., Иванцов Н.Ю., Скрябин В.В. и др. О результатах проведения анализа надёжности механических устройств раскрытия панелей солнечных батарей МКА НТ-100 // Решетнёвские чтения: матер. XX Юбилейной междунар. науч. конф., посвящ. памяти генер. конструктора ракет.-космич. систем акад. М.Ф. Решетнёва (9–12 ноября 2016, г. Красноярск). – Красноярск: СибГАУ, 2016. – Ч. 1. – С. 620–621.

187. Муромов И.А. 100 великих катастроф. – М.: Вече, 2004. – 335 с.

188. ГОСТ 27.003–90. Надёжность в технике. Состав и общие правила задания требований по надёжности. – М.: Стандартиформ, 2007. – 19 с., разд. паг.

189. Похабов Ю.П. О дефиниции термина «надёжность» // Надёжность. – 2017. – Т. 17, № 1. – С. 4–10.

190. Степаненко Е.А. Математические методы оценивания надёжности технических систем и техногенного риска. Ч. 1. – Краснодар: Кубан. гос. ун-т, 2010. – 201 с.

191. ГОСТ 27.002–83. Надёжность в технике. Термины и определения. – М.: Изд-во стандартов, 1984. – 30 с.

192. ГОСТ Р 52104–2003. Ресурсосбережение. Термины и определения. – М.: Изд-во стандартов, 2003. – 15 с., разд. паг.

193. Математический энциклопедический словарь / гл. ред. Ю.В. Прохоров. – М.: Сов. энциклопедия, 1988. – 847 с.

194. Чертов А.Г. Физические величины (терминология, определения, размерности, единицы). – М.: Высш. шк., 1990. – 335 с.

195. Сугак Е.В., Василенко Н.В., Назаров Г.Г. и др. Надёжность технических систем. – Красноярск: НИИ СУВПТ, 2001. – 608 с.

196. Шиманский Ю.А. Динамический расчёт судовых конструкций / под общ. ред. В.И. Першина. – Л.: ГСИСП, 1963. – 444 с.

197. Надёжность и эффективность в технике: Справочник: в 10 т. / ред. совет: В.С. Авдуевский и др. – М.: Машиностроение, 1988. Т. 5: Про-

ектный анализ надёжности / под ред. В.И. Патрушева и А.И. Рембезы. – 316 с.

198. Барлоу Р., Прошан Ф. Статистическая теория надёжности и испытания на безотказность. – М.: Наука, 1984. – 328 с.

199. ГОСТ Р 15.201–2000. Система разработки и постановки продукции на производство. Продукция производственно-технического назначения. Порядок разработки и постановки продукции на производство. – М.: Стандартинформ, 2008. – 15 с., разд. паг.

200. ГОСТ 3.1102–81. Единая система технологической документации. Стадии разработки и виды документов. – М.: Стандартинформ, 2006. – 8 с., разд. паг.

201. ГОСТ 2.118–2013. Единая система конструкторской документации. Техническое предложение. – М.: Стандартинформ, 2015. – 9 с., разд. паг.

202. ГОСТ 2.119–2013. Единая система конструкторской документации. Эскизный проект. – М.: Стандартинформ, 2015. – 9 с., разд. паг.

203. Похабов Ю.П., Валишевский О.К. Генезис надёжности уникальных высокоответственных систем // Надёжность. – 2016. – № 3. – С. 47–53.

204. Похабов Ю.П. Подход к обеспечению надёжности уникальных высокоответственных систем на примере крупногабаритных трансформируемых конструкций // Надёжность. – 2016. – № 1. – С. 24–36.

205. ГОСТ 2.601–2006. Единая система конструкторской документации. Эксплуатационные документы. – М.: Стандартинформ, 2006. – 36 с., разд. паг.

206. Коган Б.И. Конструкторско-технологическое обеспечение надёжности сельскохозяйственных машин / Б.И. Коган, В.И. Мясенко, А.П. Черныш; под ред. В.И. Мясенко. – Кемерово: Кузбассвузиздат, 2004. – 104 с.

207. Дмитриевский Е.С. Конструкторско-технологическое обеспечение эксплуатационной надёжности авиационного радиоэлектронного оборудования. – СПб.: СПбНУАП, 2001. – 88 с.

208. Долецкий В.А., Григорьев М.А. Конструкторско-технологические методы обеспечения надёжности двигателей. – М.: Изд-во стандартов, 1973. – 60 с.

209. Конструкторско-технологические методы обеспечения качества изделий машиностроения / М.А. Вишняков, Ю.А. Вашуков. – Самара: СГАУ, 2005. – 84 с.

210. ОСТ 92-0949–74. Клеи. Типовые технологические процессы склеивания материалов. – М.: Изд-во стандартов, 1974. – 177 с.

211. ПО 154-8–2012. Система менеджмента качества. Особо ответственные и критичные операции. Порядок разработки, согласования и утверждения. – Железногорск: ОАО «ИСС», 2012. – 17 с.

212. Герсеванов Н.М. Применение математической логики к расчёту сооружений / Герсеванов Н.М. Собр. соч. – М.: Стройвоенмориздат, 1948. – Т. 1. – С. 123–203.

213. Гаванде А. Чек-лист. Как избежать глупых ошибок, ведущих к фатальным последствиям. – М.: ООО «Альпина Паблишер», 2014. – 204 с.

214. Авижиенис А., Лапри Ж.-К. Гарантоспособные вычисления: от идеи до реализации в проектах // ТИИЭР. – 1986. – Т. 74, № 5. – С. 8–21.

215. EN 1990:2002. Eurocode – Basis of structural design. Brussels: European Committee for Standardization, 2005. – 116 p.

216. Похабов Ю.П. Технология разработки изделий одноразового срабатывания с малой вероятностью отказов // Наука и технологии. Том 3. Материалы XXXVII Всероссийской конференции, посвящённой 70-летию Государственного ракетного центра им. академика В.П. Макеева. – М.: РАН, 2017. – С. 43–50.

217. Похабов Ю.П. О методе конструкторско-технологического анализа надёжности // Решетнёвские чтения: материалы XIX Междунар. науч. конф. (10–14 ноября 2015, г. Красноярск). – Красноярск: СибГАУ, 2015. – Ч. 1. – С. 126–128.

218. ОСТ 92-0290–73. Номенклатура таблиц, расчётов, инструкций и прочих документов. – М.: Изд-во стандартов, 1973. – 23 с.

219. ГОСТ 16504–81. Система государственных испытаний продукции. Испытания и контроль качества продукции. Основные термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2011. – 24 с.

220. Севастьянов Н.Н., Андреев А.И. Основы управления надёжностью космических аппаратов с длительными сроками эксплуатации. – Томск: Издат. Дом ТГУ, 2015. – 266 с.

221. SAMCO Final Technical Report: F08a Guideline for the assessment of existing structures / W. Rucker, F. Hille, R. Rohrman. – Berlin: Federal Institute of Materials Research and Testing (BAM), 2006. – 33 p.

222. ГОСТ 15.309–98. Система разработки и постановки продукции на производство. Испытания и приёмка выпускаемой продукции. Основные положения. – Минск: Стандартинформ, 2008. – 16 с., разд. паг.

223. Ржаницын А.Р. Теория расчёта строительных конструкций на надёжность. – М.: Стройиздат, 1978. – 239 с.

224. ГОСТ 27.310–95. Надёжность в технике. Анализ видов, последствий и критичности отказов. Основные положения. – Минск: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 1995. – 14 с.

225. Бочкова А.Н., Рудаковская Г.А. Анализ характера и последствий отказов. – Пенза: ПГУ, 2004. – 44 с.

226. Золотов А.А., Матвеев Ю.А., Шаевич С.К. Методы оценки и обеспечения безопасности ракетно-космической техники при разработке. – М.: МАИ, 2002. – 67 с.
227. ГОСТ Р 51901.12–2007. Менеджмент риска. Метод анализа видов и последствий отказов. – М.: Стандартинформ, 2008. – 40 с.
228. СТО РЖД 1.05.509.12–2008. Система управления эффективностью поставок. Руководство по анализу видов и последствий потенциальных отказов продукции и технологических процессов. – М., 2008. – 28 с.
229. Рябинин И.А. Надёжность и безопасность структурно-сложных систем. – СПб.: Политехника, 2000. – 248 с.
230. ГОСТ 12766.1–90. Проволока из прецизионных сплавов с высоким сопротивлением. Технические условия. – М.: Изд-во стандартов, 1990. – 16 с.
231. Биргер И.А., Мавлютов Р.Р. Сопротивление материалов. – М.: Наука, 1986. – 560 с.
232. ОСТ 92-1741–90. Сварка и сваркопайка лазерная импульсная. Типовой технологический процесс. – М.: Изд-во стандартов, 1990. – 43 с.
233. ГОСТ 15835–2013. Прутки из бериллиевой бронзы. Технические условия. – М.: Стандартинформ, 2014. – 15 с., разд. паг.
234. Бейли Д., Райт Э. Волокнистая оптика: теория и практика. – М.: КУДИЦ-ОБРАЗ, 2006. – 320 с.
235. ОСТ 92-1615–2013. Микросхемы интегральные и приборы полупроводниковые. Общие требования по защите от статического электричества. – М.: Изд-во стандартов, 2013. – 30 с.
236. ГОСТ 19005–81. Средства обеспечения защиты изделий ракетно-космической техники от статического электричества. Общие требования к металлизации и заземлению. – М.: Изд-во стандартов, 1993. – 37 с.
237. Хопин П.Н. Оценка работоспособности пар трения с твёрдосмазочными покрытиями в условиях вакуума // Вестник НПО имени С.А. Лавочкина. – 2016. – № 2. – С. 85–90.
238. Ярош В.М., Моишеев А.А., Броневец М.А. Исследование материалов на трение и износ в открытом космическом пространстве на орбите вокруг Луны // Трение и износ. – 2003. – № 6. – С. 626–635.
239. Крагельский И.В., Любарский И.М., Гусяков А.А. и др. Трение и износ в вакууме. – М.: Машиностроение, 1973. – 216 с.
240. Блехман И.И. Вибрационная механика. – М.: Физматлит, 1994. – 400 с.
241. ОСТ 92-1542–83. Соединения резьбовые. Методы предохранения от самоотвинчивания. – М.: Изд-во стандартов, 1983. – 59 с.
242. ОСТ 92-4798–97. Оборудование съёмное космических аппаратов. Общие требования. – М.: Изд-во стандартов, 1997. – 14 с.

243. Вайнберг Д.В., Вайнберг Е.Д. Расчёт пластин. – Киев: Будівельник, 1970. – 436 с.
244. Вольмир А.С. Гибкие пластины и оболочки. – М.: ГИТТЛ, 1956. – 419 с.
245. Осинцев О.Е., Федоров В.Н. Медь и медные сплавы. Отечественные и зарубежные марки: справочник. – М.: Машиностроитель, 2004. – 336 с.
246. Андреева Е.О., Блинов А.Ф., Гиммельман В.Г. и др. Трансформируемая штанга крупногабаритного рефлектора // Решетнёвские чтения: материалы XIX Междунар. науч. конф. (10–14 ноября 2015, г. Красноярск). – Красноярск: СибГАУ, 2015. – Ч. 1. – С. 65–67.
247. ОСТ 92-948–74. Клеи. Марки, разрешённые к применению. – М.: Изд-во стандартов, 1974. – 82 с.
248. Лепихин А.М., Москвичёв В.В., Черняев А.П. и др. Экспериментальная оценка прочности и герметичности металлокомпозитных сосудов высокого давления // Деформация и разрушение материалов. – 2015. – № 6. – С. 30–36.
249. Конструирование приборов: в 2-х кн. Кн. 1 / под ред. В. Краузе. – М.: Машиностроение, 1987. – 384 с.
250. ГОСТ ISO 9000–2011. Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь. – М.: Стандартиформ, 2012. – 43 с.
251. Инженерное чудо: в Китае открылся мост, проходящий не через реку, а по её руслу [Электронный ресурс] // Novate: хостинг. – Режим доступа: <http://www.novate.ru/blogs/190815/32628/> (31.10.2017).
252. ОСТ 92-8730–82. Монтаж бортовой кабельной сети. Технические требования. – М.: Изд-во стандартов, 1982. – 51 с.
253. 761.TC330-553-13. Техническая справка. Технические требования по проектированию замков разделения составных частей КА. – Железногорск: АО «ИСС», 2013. – 6 с.
254. Шишмарёв В.Ю. Надёжность технических систем. – М.: Издат. центр «Академия», 2010. – 304 с.
255. Орлов П.И. Основы конструирования: в 2-х кн. Кн. 1 / под ред. П.Н. Учаева. – М.: Машиностроение, 1988. – 560 с.
256. Хорошев А.Н. Введение в управление проектированием механических систем. – Белгород, 1999. – 372 с.
257. Леликов О.П. Основы расчёта и проектирования деталей и узлов машин. – М.: Машиностроение, 2007. – 464 с.
258. Дмитриук Г.Н., Пястик И.Б. Надёжность технических систем. – М.: Машиностроение, 1966. – 184 с.
259. Злотин Б.Л., Зусман А.В. Решение исследовательских задач. – Кишинёв: МНТЦ «Прогресс», Картя Молдовеняскэ, 1991. – 204 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Приведём цитаты и выражения, которые так или иначе перекликаются с вопросами надёжности. При практической деятельности не будет лишним держать их в уме.

Беда не в том, что они не видят решения, а в том, что они не видят проблемы (Гилберт Кит Честертон).

Без противоположности ничто не обнаруживается (Якоб Бёме).

Большая часть оборудования изготавливается не так, как планировал конструктор. Это связано с размещением оборудования, плохим пониманием конструктивных решений или с плохим пониманием спецификации оборудования (Джерри Мэддон «Сто правил руководителей NASA», правило 61).

В спешке – чёрт (Вильям Ослер).

В старые времена инженеры имели практический опыт, технические специалисты понимали, как работает электроника и что нужно для того, чтобы она заработала. Знали это и схемотехники, но сейчас наверняка это знает только компьютер, и он не рассказывает об этом (Джерри Мэддон «Сто правил руководителей NASA», правило 65).

Вероятность возникает от недостатка знаний. Для совершенного разума, который мог бы видеть всю картину мира и все причинно-следственные связи, понятие вероятности уступило бы место полной определённости (Скилеф).

Всё на свете имеет причину, даже, если мы не видим всех причин (Скилеф).

Всё сложное менее совершенно, чем простое (Плотин).

Всякая точная наука основывается на приближительности (Бертран Рассел).

Всякая формула длиннее двух дюймов – скорее всего неверна (старая поговорка английских инженеров).

Где-то там, за пределом познания, где загадка, туманность и тайна, некто скрытый готовит заранее то, что позже случится «случайно» (Игорь Губерман).

Гораздо труднее увидеть проблему, чем найти её решение. Для первого требуется воображение, а для второго только умение (Джон Десмонд Бернал).

Если вы можете оценить то, о чём говорите, и выразить это количественно, тогда вы что-то об этом знаете, но если вы не можете это оценить и выразить количественно, тогда ваши познания скудны и неудовлетворительны (Уильям Томсон, лорд Кельвин).

Если неприятность может случиться, она случается (Закон Мерфи).

Если ты не знаешь никакой теории, то это еще не означает, что ты практик (Леонид Генрихович Хачиян «Избранные труды»).

Заблуждение – нарушение правил использования имён (Мо-цзы).

Знание немногих принципов освобождает от знания многих фактов (Рене Декарт).

Знания часто пересматриваются на основе результатов моделирования или испытания, но модели компьютеров могут скрывать недостатки, не последними из которых являются неверные исходные данные (Джерри Мэддон «Сто правил руководителей NASA», правило 64).

И в какой-то момент все эти ошибки складываются в жизнь, которая пошла по неверному пути (Кир Булычев «Марсианское зелье»).

Из одного – всё, из всего – одно (Гераклит).

Измерить всё, что поддается измерению, а что не поддается – сделать измеряемым (Галилео Галилей).

Имейте в виду, если вы сделаете быстро и плохо, то люди забудут, что вы сделали быстро, и запомнят, что вы сделали плохо. Если вы сделаете медленно и хорошо, то люди забудут, что вы сделали медленно, и запомнят, что вы сделали хорошо (Сергей Павлович Королёв).

Исключите все другие факторы, оставшийся и будет истинной причиной (Артур Конан Дойль «Знак четырёх»).

Истинное знание – знание причин (Галилео Галилей).

Когда вы исключите невозможное, то, что останется, даже маловероятное, должно быть правдой (Артур Конан Дойль «Берилловая диадема»).

Компьютеры ненадёжны, но люди еще ненадежнее (первый закон ненадёжности Джилба).

Кто не понимает ничего, кроме химии, тот и её понимает недостаточно (Георг Кристоф Лихтенберг).

Ложный принцип – это скверные дрожжи, которые даже в малом количестве портят всё тесто (Пьер Бейль).

Любая система, зависящая от человеческой надёжности, ненадёжна (второй закон ненадёжности Джилба).

Люди часто ошибочно принимают порядок своих идей за порядок природных явлений (Джеймс Джордж Фрезер).

Массовые ошибки перерастают в правило (Анджелко Эрделянин).

Математика, подобно жёрнову, перемалывает то, что под него засыпают, и как, засыпав лебеду, вы не получите пшеничной муки, так, исписав целые страницы формулами, вы не получите истины из ложных предпосылок (Томас Генри Гексли).

Машинная программа выполняет то, что вы ей приказали делать, а не то, что бы вы хотели, чтобы она делала (третий закон Грида).

Мелкие детали самые важные (Артур Конан Дойль «Гайна Боскомской долины»).

Многие вещи нам не понятны не потому, что наши понятия слабы, но потому, что сии вещи не входят в круг наших понятий (Козьма Прутков).

Мы абсолютно уверены только в том, чего не понимаем (Эрик Хоффер).

Мы знаем прошлое, но не можем управлять им. Но можно управлять будущим, не зная его (Клод Элвуд Шеннон).

Не применять современные технологии, в том числе и компьютерные системы, – большая ошибка. Но забывать о том, что компьютеры только моделируют мышление – ещё большая ошибка (Джерри Мэддон «Сто правил руководителей NASA», правило 62).

Не следует множить сущности без необходимости (Уильям Оккам).

Неверная значащая цифра в расчётах, это ошибка, а лишняя после запятой – пол-ошибки. Всякие лишние усложняющие вычисления, не мотивированные необходимостью – смертный грех! Вот так! Любая прикладная теория должна бить в точку – быть предельно простой! (Алексей Николаевич Крылов).

Неизбежное неизбежно наступит (Сомерсет Моэм «Острие бритвы»).

Нельзя иметь верного понятия о том, что не испытано (Вольтер).

Неправильное решение, принятое ранее, может быть пересмотрено позднее. Правильное решение, принятое слишком поздно, ничего не может изменить (Джерри Мэддон «Сто правил руководителей NASA», правило 82).

Не следует искать эффективных решений в границах неэффективности... (NN).

Нет гвоздя и нет копыта, нет копыта – нет коня... Нет коня и гибнет воин, гибнет воин – нету войска, нету войска – пало царство... А виноват один лишь гвоздь! (старинная английская баллада, которую любил цитировать Аксель Иванович Берг).

Нет ничего более обманчивого, чем факт очевидный (Артур Конан Дойль «Гайна Боскомской долины»).

Нет ничего случайного. Случайность – это то, что недоступно видению (Михаэль Лайтман).

Никакое количество экспериментов не может доказать, что я прав; опровергнуть же меня может один единственный эксперимент (Христиан Гюйгенс).

Никогда незнание не приносит зла; пагубно только заблуждение. Заблуждаются люди не потому, что не знают, а потому, что воображают себя знающими (Жан-Жак Руссо).

Никто не знает, что такое «знать», положившись на то, чего не знает (Чжуан-цзы).

Ничто вообще не бывает совершенным с самого начала, но всё, что имело начало и первооснову, может со временем совершенствоваться (поговорка из сборника латинских поговорок, составленного Эразмом Роттердамским).

Обычно случается то, чего ожидаешь меньше всего (Бенджамин Дизраэли).

Один из наиболее фундаментальных законов природы, подтверждённый наукой, заключается в том, что в физическом мире нет ничего беспричинного. Просто невозможно представить творение без Творца (Вернер фон Браун).

Опасность не в том, что компьютер однажды начнёт мыслить, как человек, а в том, что человек однажды начнёт мыслить, как компьютер (Сидни Дж. Харрис).

Отсутствие доказательства не является доказательством отсутствия (Карл Саган).

Ошибка – это совершенно нормальная вещь, а вот неудача – нет. Неудача – это ошибка, которую вы не смогли исправить; следовательно, всегда разрабатывайте планы и альтернативные решения для аналогичных ситуаций или планы для ситуаций с высокими рисками (Джерри Мэддон «Сто правил руководителей NASA», правило 94).

Повторяемость события не подтверждает его правильность (закон Саудера).

Познание может быть... только упрощением, но никогда отображением действительности (Генрих Риккерт).

Порой, задумываясь о том, какие колоссальные последствия происходили из-за мелочей, я склоняюсь к мысли, что мелочей не существует (Брус Бартон).

Правда редко бывает абсолютной и никогда – простой (Оскар Уайльд «Как важно быть серьёзным»).

Прежде всего, научайся каждую вещь называть её именем – это самая первая и важнейшая из всех наук (Пифагор из Самоса).

Раньше или позже ошибочное мышление проявится в ошибочном поведении (сэр Джулиан Хаксли «Эссе биолога»).

Результат математических вычислений есть решение уравнения, а вовсе не проблемы (пятая статистическая аксиома Эшли-Перри).

Семена будущих проблем закладываются на ранних стадиях проекта. Предварительное планирование на этих стадиях жизненно важно для проекта. Анализ наиболее неудачных проектов и проблем в проектах показывает, что все неудачи были тщательно запланированы с са-

мого начала (Джерри Мэддон «Сто правил руководителей NASA», правило 15).

Сила мелочей в том, что их много (американская поговорка).

Система имеет тенденцию скорее усложняться, нежели упрощаться, до тех пор, пока итоговая ненадёжность не станет неприемлемой (четвертый закон ненадежности Джилба).

Сколь бы сложной ни казалась проблема на первый взгляд, она, если правильно к ней подойти, оказывается ещё более сложной (Пол Андерсон).

Случайности – это язык Бога (Виктория Токарева «Римские каникулы»).

Случайность – это вовремя не выявленная закономерность (Михаил Мамчич).

Теоретизировать, не узнав факты, ошибка принципиальная (Артур Конан Дойль «Скандал в Богемии»).

То, что мыслимо, то осуществимо (Мао Цзэдун).

Только при полном понимании задач можно найти соответствующие способы их решения. Для результатов важнее поставить правильные вопросы, чем правильные ответы на ошибочные вопросы (Кристиан Норберг-Шульц).

Тот, кто сам не убедится, того не убедишь (Август Платен фон Халлермюнде).

Учёные должны помнить, что системы существуют не в природе, а только в сознании людей (Клод Бернар).

Хорошо летают только красивые самолёты (Андрей Николаевич Туполев).

Цель расчёта не число, а понимание (Ричард Уэсли Хемминг «Численные методы для научных работников и инженеров»).

Чего не понимаем, тем мы не обладаем (Иоганн Вольфганг фон Гёте).

Человек в своей организующей деятельности является только учеником и подражателем великого всеобщего организатора – природы. Поэтому методы человеческие не могут выйти за пределы методов природы и представляют по отношению к ним только частные случаи (Александр Александрович Богданов «Очерки всеобщей организационной науки»).

Чем более высоких стандартов достигает теория, тем непонятней становятся книги. А для написания простых учебников не достаёт энтузиазма и вдохновения, присущих этапу рождения идеологии... (Валерий Босс, «Лекции по математике»).

Чётко определяйте значения слов – и вы высвободите мир от половины его недоразумений (Готфрид Вильгельм Лейбниц).

Числа – символы для обозначения предметов; числа и предметы – не одно и то же (вторая статистическая аксиома Эшли-Перри).

Число ошибок, которые нельзя обнаружить, бесконечно, в противовес числу ошибок, которые можно обнаружить, – оно конечно по определению (восьмой закон ненадёжности Джилба).

Чтобы правильно задать вопрос, нужно знать большую часть ответа (Роберт Шекли «Верный вопрос»).

Электронный мозг будет думать за нас точно так же, как электрический стул за нас умирает (Станислав Ежи Лец).