

САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени академика С. П. КОРОЛЕВА

В. И. Куренков

В. И. Кузнецов

В.М. Сайгак

**МЕТОДИЧЕСКИЕ
И ОРГАНИЗАЦИОННО-
ТЕХНИЧЕСКИЕ
ВОПРОСЫ НАДЕЖНОСТИ
КОСМИЧЕСКИХ
АППАРАТОВ**

МИНИСТЕРСТВО
ОБЩЕГО И ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С. П. КОРОЛЕВА

В. И. Куренков В. И. Кузнецов *В.М. Сайгак*

МЕТОДИЧЕСКИЕ
И ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКИЕ
ВОПРОСЫ НАДЕЖНОСТИ
КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Конспект лекций

САМАРА 1997

УДК 629. 7. 017.1 (075)

Методические и организационно-технические вопросы надежности космических аппаратов. Конспект лекций / В. И. Куренков, В. И. Кузнецов, В. М. Сайгак; Самар гос. аэрокосм. ун-т. Самара, 1997. 42 с.
ISBN 5-7883-0009-6

Обсуждается место и роль надежности в структуре сложной технической системы. Излагаются методические вопросы нормирования надежности космических аппаратов. Рассматриваются вопросы обеспечения надежности на различных этапах жизненного цикла космических аппаратов.

Данный конспект лекций предназначен студентам, изучающим курс надежности летательных аппаратов, а также он может быть полезен слушателям факультета повышения квалификации инженеров из числа работников аппарата органов управления и создающих космическую технику.

Подготовлен на кафедре «Летательные аппараты». Изд. 12.
Табл. 4. Библиогр. : 20 назв.

Печатается по решению редакционно-издательского совета Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С. П. Королёва

Рецензенты: А. Б. Писинин, С. Н. Чернов

ISBN 5-7883-0009-6

© В. И. Куренков, В. И. Кузнецов,
В. М. Сайгак, 1997
© Самарский государственный
аэрокосмический университет, 1997

ВВЕДЕНИЕ

При создании космических аппаратов и систем большое внимание уделяется их надежности, тем не менее отказов космической техники избежать не удастся и они приводят к огромным потерям средств, сил и времени, а иногда и к человеческим жертвам. Поэтому проблема создания надежных изделий космической техники не только не снимается с повестки дня, но становится еще более актуальной. Это связано с усложнением техники, возрастанием сложности решаемых задач, особыми условиями эксплуатации.

По своей сути проблема создания надежных космических аппаратов и систем является комплексной, в которой свое место отводится не только техническим, но и организационным вопросам на всех этапах жизненного цикла изделий, начиная с момента зарождения замысла о создании объекта и кончая этапом эксплуатации.

В этой связи встает задача подготовки специалистов, способных ориентироваться в вопросах надежности космической техники и имеющих представление об организационных и методических вопросах обеспечения создания надежных объектов и систем.

Цель настоящего пособия — дать начальные знания обучающимся в области надежности космических аппаратов.

Основными задачами данного пособия являются:

определение места и роли дисциплины «Надежность космических аппаратов» в ряду других дисциплин по проектированию и созданию летательных аппаратов и комплексов;

получение обучающимися представления о современном состоянии вопроса, нормативной и справочной литературе по надежности;

изучение методических и организационно-технических вопросов обеспечения создания надежных изделий космической техники.

Вопросы оценки надежности элементов и систем космических аппаратов представляют собой отдельный большой раздел надежности и в данном пособии не рассматриваются. Эти вопросы изложены, например, в учебном пособии [15].

1. КРАТКИЙ ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ ПО НАДЕЖНОСТИ

Поскольку методы теории надежности применимы в различных областях науки и практики, то и литература по надежности обширна. Имеется достаточное количество учебной, монографической и справочной литературы по надежности.

Наиболее полно вопросы надежности представлены в десяти-томном справочнике «Надежность и эффективность в технике» [1]. В этом справочнике изложены методологические аспекты проблемы надежности технических изделий, расчетные и организационные методы обеспечения надежности изделий сложной техники на различных этапах ее жизненного цикла, начиная с замысла проектантов до момента старения и списания техники.

Применение методов теории надежности к летательным аппаратам имеет свою специфику. Вопросам надежности летательных аппаратов посвящены учебники А.А.Кузнецова, Л.И.Волкова, А.М.Шишкевича, Л.Л.Анциелиовича [2—5] и др. Причем в них рассматриваются отдельные вопросы проблемы надежности летательных аппаратов.

В учебнике А.А.Кузнецова [2] рассматриваются в основном вопросы надежности механических частей летательных аппаратов. В книгах Л.И.Волкова и А.М.Шишкевича [3, 4] основное внимание уделяется вопросам отработки изделий на стадии производства и эксплуатации. Работа Л.Л.Анциелиовича [5] посвящена вопросам надежности и живучести самолета.

Указанные учебники не охватывают некоторых вопросов надежности космических аппаратов, однако недостающие сведения можно почерпнуть из монографий, посвященных вопросам эффективности и надежности космической техники. Это работы А.А.Золотова, А.А.Лебедева, О.П.Нестеренко, Ф.Р.Ханцеверова, В.В.Остроухова [6—8] и др.

Отдельные вопросы надежности механических систем и надежности структурно-сложных систем наиболее доступно в методическом плане представлены в монографиях [9—12].

При расчетной оценке надежности изделий используют методы теории вероятностей и математической статистики. Эти методы изложены в работах [13, 14] и др.

Кроме того, по проблеме надежности имеется достаточное количество нормативной литературы.

По вопросам живучести космических аппаратов при воздействии метеорных и техногенных частиц систематизированной литературы практически нет, однако по отдельным вопросам этой проблемы публикаций достаточно.

Например, вопросы метеорной опасности изложены в справочнике по безопасности космических полетов [16] и в учебном пособии [17], вопросам живучести самолета посвящены учебник [5] и монография [18], вопросы изучения механизма разрушения соударяющихся тел с большой скоростью изложены в многочисленных публикациях на эту тему.

Кроме учебной, справочной и монографической литературы по надежности имеется нормативная литература, а именно стандарты по надежности.

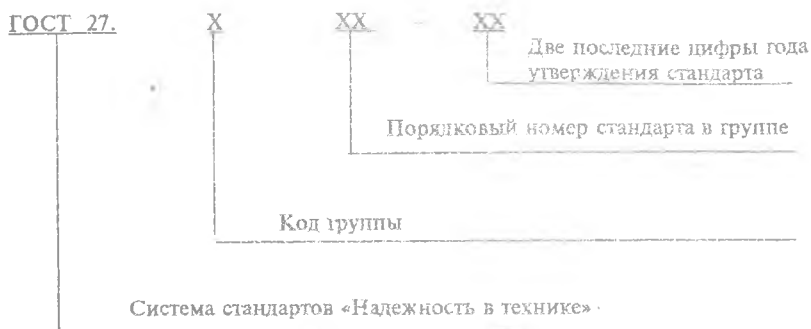
Основным документом, в котором изложены состав системы стандартов по надежности, является ГОСТ 27. 001-81 «Система стандартов. Надежность в технике. Основные положения». Согласно этому документу Государственные стандарты по надежности классифицируются по группам, каждой из которой присвоен определенный код. Такая спецификация в укрупненном виде представлена в табл. 1.1.

Т а б л и ц а 1.1

Классификация стандартов по надежности

Код группы	Классификационные группы объектов стандартизации
0	Общие вопросы надежности
1	Нормирование надежности
2	Методы расчета надежности
3	Методы обеспечения надежности
4	Испытания и контроль надежности
5	Сбор и обработка информации по надежности
6	Резерв

Государственные стандарты по надежности должны обозначаться в соответствии со схемой



Примеры обозначения и наименования стандартов:

ГОСТ 27. 002-89. Надежность в технике. Основные понятия.

Термины и определения.

ГОСТ 27. 103-83. Надежность в технике. Критерии отказов и предельных состояний. Основные положения.

ГОСТ 27. 301-83. Надежность в технике. Прогнозирование надежности изделий при проектировании. Общие требования.

Кроме того, существуют стандарты по надежности, которые не подчиняются требованиям по обозначению, представленным в ГОСТ 27. 001-81. Это объясняется тем, что некоторые стандарты выпущены ранее и они периодически продлеваются.

2. МЕСТО И РОЛЬ НАДЕЖНОСТИ В СТРУКТУРЕ СЛОЖНОЙ ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

2.1. Космический аппарат как сложная техническая система

Под *системой* обычно подразумевается совокупность связанных друг с другом различных элементов, составляющих нечто целое.

Под *элементом* системы понимают часть системы, предназначенную для выполнения определенных функций.

Система определенным образом организована из элементов.

Совокупность элементов системы и их связей определяет *структуру* системы.

Всегда можно представить себе более обширную систему (надсистему), в которую входит данная, и всегда можно выделить

из данной системы какую-либо ее часть, являющуюся более ограниченной системой (подсистемой).

Если рассматривать в качестве системы космический аппарат (КА), то надсистемами будут орбитальный комплекс, космический комплекс, космическая система, как это показано на рис. 2.1, а подсистемами — различные бортовые системы КА и их составляющие, как это показано на рис. 2.2.



Рис. 2.1. Структура космической системы

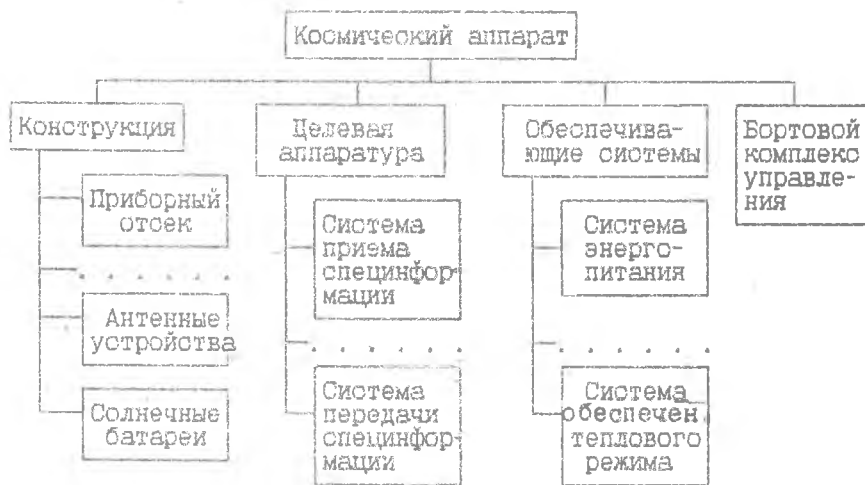


Рис. 2.2. Структура космического аппарата

Структура системы, в которой имеется несколько подчиненных уровней, образует так называемую иерархическую структуру, в которой элементы нижнего уровня играют подчиненную роль.

Каждая техническая система создается для определенной цели. Понятие цели является высшим по отношению к системе. Цель достигается благодаря взаимодействию с внешней средой.

Например, для космической системы наблюдения целью может служить получение снимка определенной местности или определение зон пожаров и других стихийных бедствий.

Система достигает цели благодаря *управлению* при взаимодействии элементов системы между собой и при взаимодействии с внешней средой.

Например, космический аппарат должен быть ориентирован определенным образом на объект наблюдения, осуществить съемку местности и передать информацию на Землю.

Для того чтобы система достигла цели (выполнила поставленную задачу), она должна обладать определенными свойствами, важнейшими из которых являются качество, эффективность и надежность.

2.2. Качество, эффективность и надежность — важнейшие свойства сложных технических систем

Качество системы — это свойство системы, обеспечивающее ее функционирование и пригодность к выполнению своего назначения. Другими словами, качество системы — одно из ее свойств, обязательных для достижения цели системы, обеспечения ее работоспособности.

Показатели качества — количественные характеристики свойств системы, обеспечивающих пригодность системы к выполнению своего назначения.

Например, качество космической системы наблюдения характеризуется:

- способностью наблюдать заданный район;
- спектральными характеристиками аппаратуры наблюдения;
- пространственной разрешающей способностью;
- обзорностью;
- периодичностью и т. д.

Эффективность системы — это свойство системы получать

результат (эффект) ее функционирования на определенном интервале времени, служащий средством достижения цели.

Понятие эффективности относят обычно к *операции*, под которой понимают любую согласованную совокупность действий, объединенных общим замыслом и единой целью.

Способ использования активных средств в операции называют *стратегией*.

Степень соответствия реального результата операции требуемому результату называют эффективностью операции.

Показатель эффективности количественно выражает степень соответствия реального результата операции требуемому для заданных условий и стратегий.

Приведем некоторые из показателей эффективности применительно к космическим аппаратам наблюдения:

1. Информационная производительность (площадь сфотографированной поверхности, число кадров и т. п.).

2. Вероятность получения достоверной информации.

3. Оперативность (время от момента выдачи задания до момента ее получения).

4. Время функционирования системы.

5. Экономическая эффективность и др.

Различие между требованиями к качеству и эффективности системы состоит в том, что первые позволяют выявить необходимые альтернативы, а вторые — выбрать из них лучшие.

Эффективность космической системы (КС) зависит от характеристик и параметров системы, условий и стратегии применения. На рис. 2.3 схематично представлены составляющие эффективности космического комплекса с одним аппаратом наблюдения.

Надежность является одной из характеристик аппарата или комплекса.

Различие между требованиями к эффективности и надежности системы состоит в том, что первые служат для выбора оптимальных решений, связанных с обоснованием основных технических характеристик (параметров) сложных изделий и способов их использования, а вторые — для выбора оптимальных технических решений, связанных с необходимостью сохранения основных технических характеристик изделий и их элементов в течение требуемого промежутка времени.

Надежность — свойство объекта (системы) сохранять во

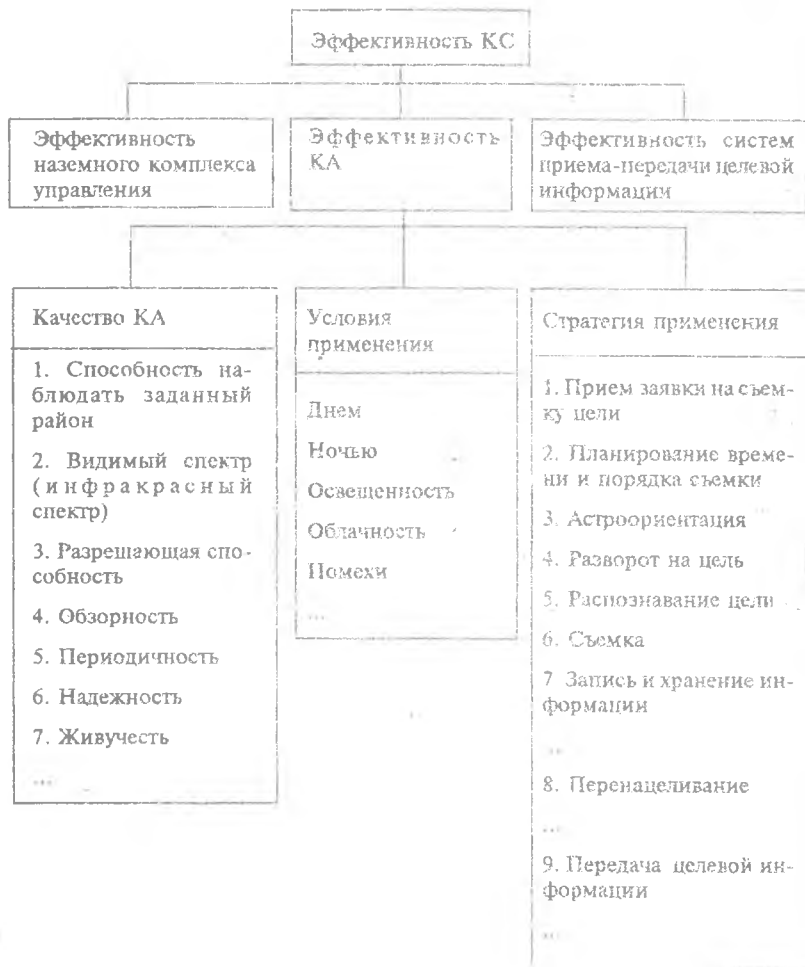


Рис. 2.3. Составляющие эффективности КС и КА

времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования.

Надежность является комплексным свойством, которое в зависимости от назначения объекта и условий его применения может включать безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость или определенное сочетание этих свойств.

Безотказность -- свойство объекта непрерывно сохранять работоспособное состояние в течение некоторого времени или некоторой наработки.

Долговечность -- свойство объекта сохранять работоспособное состояние до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонта.

Ремонтпригодность -- свойство объекта, заключающееся в приспособленности к поддержанию и восстановлению работоспособного состояния путем технического обслуживания и ремонта.

Сохраняемость -- свойство объекта сохранять в заданных пределах значения параметров, характеризующих способности объекта выполнять требуемые функции в течение и после хранения и (или) транспортирования.

Приведенные термины надежности определены стандартом (ГОСТ 27.002-89) и относятся ко всем техническим изделиям.

2.3. Надежность космических комплексов и аппаратов

Применительно к космическим комплексам (аппаратам) используют свои термины и определения надежности, которые не противоречат определениям, приведенным выше, а лишь конкретизируют их и в этой связи являются более простыми. Приведем эти термины.

Надежность космического комплекса (КК) -- совокупность свойств, характеризующих способность КК обеспечивать в процессе функционирования получение заданного выходного эффекта.

Выходной эффект -- события или величины, характеризующие полезный результат решения системой (объектом, изделием) поставленных задач. Выходной эффект в зависимости от характера решаемых задач может быть дифференциальным или интегральным.

Интегральный выходной эффект характеризует общий результат решения системой (объектом) поставленных задач в течение всего времени функционирования. Например, количество квадратных километров поверхности, заснятых за все время существования КА.

Дифференциальный выходной эффект характеризует результаты решения системой (объектом) поставленных задач в определенный момент времени или на определенном интервале времени, который значительно меньше общего времени функционирования. Например, количество объектов, заснятых за один виток спутника, за месяц и т. п.

Выходной эффект *периода функционирования* характеризует результаты работы системы (объекта) за этот период. Например, количество информации, переданной за период связи через спутник-ретранслятор.

Отказ КК — событие, состоящее в том, что не достигается заданный выходной эффект. Например, если КА принял и переработал видеoinформацию, но не смог ее передать на Землю.

2.4. Изменение надежности КА в процессе жизненного цикла

Космические аппараты (как сложные технические системы) имеют определенный так называемый жизненный цикл, особенности которого необходимо учитывать в процессе создания и эксплуатации КА. Жизненным циклом сложной технической системы (СТС) принято называть интервал времени от начала создания СТС до конца ее эксплуатации, при этом за начало жизненного цикла можно принять зарождение идеи о необходимости создания СТС, а конец -- снятие системы с эксплуатации.

Иногда с целью экономии средств вместо создания новой СТС модернизируют старую.

Жизненный цикл космического аппарата (или комплекса) включает в себя несколько стадий, которые укрупненно представлены ниже.

1. Исследование и обоснование разработки.
2. Разработка КА.
3. Производство.
4. Эксплуатация.

На стадии исследования и обоснования разработки формируют исходные данные и технические задания (ТЗ) на проведение

научно-исследовательских работ (НИР) и опытно-конструкторских работ (ОКР).

На стадии разработки КА и комплекса создают эскизный проект (ЭП) и технические задания на составные части КА и комплекса, в том числе и ТЗ на разработку конструктивно-компоновочной схемы (ККС) КА.

На этой же стадии проводят опытно-конструкторские работы (ОКР), которые включают:

наземные автономные испытания (НАИ), состоящие из конструкторско-доводочных испытаний (КДИ) и зачетных испытаний;

наземные комплексные испытания (НКИ);

летные конструкторские испытания (ЛКИ);

летные зачетные испытания.

На этапе ОКР проводят отработку изделия и его составных частей. При необходимости делают изменения в проекте и доработки.

На стадии серийного производства выпускают установочную партию для отработки технологического процесса и тщательно контролируют качество изделий. На этой стадии возможны изменения и доработки изделий. В дальнейшем технологию поддерживают неизменной.

Эксплуатация КА и комплексов ведется в эксплуатирующих организациях и включает в себя основные технологические процессы:

приведение комплекса (или КА) в готовность к применению;

поддержание в этой готовности;

применение КА по назначению.

На стадии эксплуатации возможны отдельные доработки по замечаниям, выявленным в процессе эксплуатации, а также модернизация КА.

На рис. 2.4 схематично показано изменение надежности КА в процессе его создания, где по оси абсцисс отмечено время «жизни» КА, а по оси ординат — условный относительный показатель надежности изделия P по отношению к требуемому $P_{тр}$.

Падение функции надежности $P(t)$ при переходе от периода 1 к периоду 2 и от периода 3 к периоду 4 объясняется тем, что как правило первоначально не подтверждается высокая проектная надежность по различным причинам. В результате доработки и устранения причин отказов надежность каждого агрегата и системы, а следовательно, и КА в целом повышается.

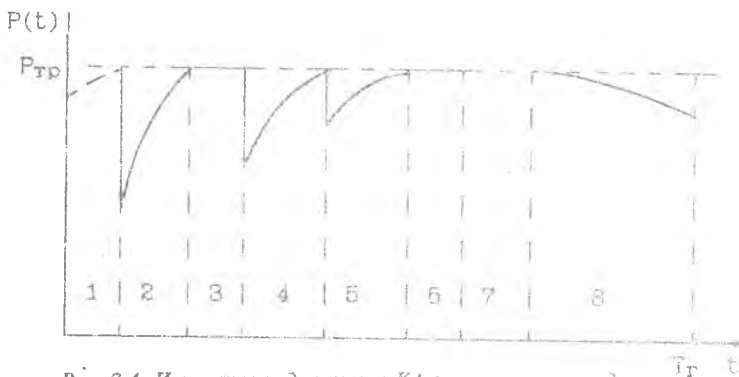


Рис. 2.4. Изменение надежности КА в процессе его создания:

1 — проектирование; 2 — КДИ; 3 — зачетные испытания; 4 — НКИ; 5 — ЛКИ; 6 — летные зачетные испытания; 7 — испытания установочной партии серийного производства; 8 — эксплуатация в течение гарантийного срока T_g .

Переход к летным испытаниям опытных образцов также сопровождается снижением функции надежности, т. к. не все условия полета удастся имитировать на Земле. Аналогичный скачок надежности имеет место и при начале испытаний образцов установочной партии, т. к. при этом технологию опытного производства заменяют новой.

В процессе эксплуатации КА его надежность падает из-за старения и износа элементов.

Ошибки при проектировании неизбежны и задача состоит в том, чтобы как можно больше ошибок устранить на ранних стадиях создания КА.

При пропуске ошибки на периодах проектирования, отработки, серийного производства и эксплуатации затраты на доработки относятся соответственно как 1:10:100:1000.

Накопление информации о надежности КА и его составных частей происходит последовательно на всех стадиях жизненного цикла КА, включая в себя сбор информации по каждому изделию.

2.5. Этапы эксплуатации и периоды функционирования КА

Отличительной особенностью создания надежных космических аппаратов является учет изменения состояния КА во времени при его эксплуатации. С этой целью все время «жизни» готового изделия разделяется на этапы эксплуатации или пери-

оды функционирования. Эти этапы или периоды могут быть более или менее крупными и степень подробности зависит от типа КА и поставленных задач по анализу надежности.

Приведем укрупненные этапы эксплуатации КА:

хранение КА до применения по назначению;

дежурство КА в ожидании применения;

подготовка к выведению на орбиту;

выведение на орбиту;

функционирование на орбите;

спуск с орбиты (для возвращаемых КА и спускаемых капсул с информацией).

Для каждого этапа характерны свои особенности или периоды функционирования. Приведем типичные периоды функционирования на орбите для КА наблюдения:

нахождение в орбитальном резерве;

нахождение в готовности к приему и обработке видеoinформации;

наблюдение и прием информации;

обработка видеoinформации;

передача видеoinформации на Землю;

корректировка системы ориентации КА;

профилактическое обслуживание и ремонт (для обслуживаемых КА) и т. п.

На каждом этапе и периоде функционирования КА может характеризоваться своими показателями надежности.

3. НОРМИРОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ

Как было показано выше, космические аппараты являются сложными не только в смысле состава, но и в смысле жизненного цикла, этапов и периодов функционирования. Поэтому необходимо установить некоторые требования, которые позволят систематизировать наши действия по созданию надежных КА. С этой целью используется понятие «нормирование надежности».

Нормирование надежности — установление в нормативно-технической документации и (или) конструкторской (проектной) документации количественных и качественных требований к надежности.

Нормирование надежности включает следующие этапы:

1. Формирование критериев отказов, повреждений и предельных состояний.

2. Выбор номенклатуры нормируемых показателей надежности космических аппаратов и составных частей.

3. Техничко-экономическое обоснование значений показателей надежности объекта и его составных частей.

4. Задание требований по надежности проектируемых КА.

Рассмотрим некоторые вопросы нормирования надежности космических аппаратов

3.1. Критерии отказов, повреждений и предельных состояний

3.1.1. Состояние объекта

Исправное состояние — состояние объекта, при котором он соответствует всем требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации.

Неисправное состояние — состояние объекта, при котором он не соответствует хотя бы одному из требований нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации.

Работоспособное состояние — состояние объекта, при котором значения всех параметров, характеризующих способность выполнять заданные функции, соответствуют требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации.

Неработоспособное состояние — состояние объекта, при котором значение хотя бы одного параметра, характеризующего способность выполнять заданные функции, не соответствует требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации.

Работоспособный объект может быть неисправным, например, если он не удовлетворяет эстетическим требованиям, причем ухудшение внешнего вида объекта не препятствует его применению по назначению.

Для сложных объектов возможны частично неработоспособные состояния, при которых объект способен выполнять требуемые функции с пониженными показателями или способен выполнять лишь часть требуемых функций.

Например, при отказе приборов системы автоматической фокусировки космического аппарата наблюдения фокусировку

можно проводить по командам с наземного комплекса управления. Производительность аппарата в этом случае снижается. При отказе приборов системы фокусировки частично работоспособное состояние аппарата можно сохранить, если для съемки выбирать объекты, расположенные на фиксированном от объекта КА расстоянии, соответствующем получению резкого изображения на приемниках изображения. Это достигается путем изменения стратегии получения выходного эффекта, а именно, выбором соответствующих целей и порядка съемки, а также путем изменения ориентации КА и т. п. Производительность аппарата при этом снижается существенно.

Предельное состояние — состояние объекта, при котором его дальнейшая эксплуатация недопустима или нецелесообразна, либо восстановление его работоспособного состояния невозможно или нецелесообразно.

3.1.2. Дефекты, повреждения, отказы

Дефект — каждое отдельное несоответствие продукции установленным требованиям.

Повреждение — событие, заключающееся в нарушении исправного состояния объекта при сохранении работоспособного состояния.

Отказ — событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния объекта.

Признаками отказов и предельных состояний космического аппарата являются:

прекращение (полное или частичное) выполнения объектом заданных функций, например, не поступает видеoinформация с космического аппарата;

отклонение заданных показателей качества за пределы установленных норм, например видеoinформация передается с потерей отдельных строк или элементов изображения;

отказы и предельные состояния составных частей объекта, которые приводят к прекращению (полному или частичному) функционирования объекта или выходу его показателей качества за установленные нормы, например солнечные батареи снизили мощность более чем на 50%;

достижение объектом назначенного ресурса или назначенного срока службы, например выработан ресурс двигательной установки и т. п.

Критичность отказа — совокупность признаков, характеризующих последствия отказа.

Различают критические и некритические отказы. Последние подразделяются на существенные и несущественные.

Например, отказ телескопа КА будет критическим, если этот телескоп один, а отказ канала передачи видеoinформации — некритическим, если этих каналов два. Последний отказ может быть существенным, если значительно уменьшается оперативность системы, или несущественным, если она изменяется мало.

Независимый отказ — отказ, не обусловленный другими отказами. Например, отказ механизма системы фокусировки вследствие его заклинивания.

Зависимый отказ — отказ, обусловленный другими отказами. Например, отказ двигателя механизма системы фокусировки вследствие нарушения работы системы электропитания (СЭП).

Внезапный отказ — отказ, характеризующийся скачкообразным изменением значений одного или нескольких параметров объекта.

Постепенный отказ — отказ, возникающий в результате постепенного изменения значений одного или нескольких параметров объекта. Например, загрязнение оптических элементов телескопа может привести к постепенному ухудшению качества изображения.

3.1.3. Временные понятия

Наработка — продолжительность или объем работы объекта. Нарботка может быть как непрерывной величиной (продолжительность работы в часах, километраж пробега и т. п.), так и целочисленной (число рабочих циклов, запусков и т. п.).

Ресурс — суммарная наработка объекта от начала его эксплуатации или возобновление после ремонта до перехода в предельное состояние. Например, ресурс работы ракетного двигателя — 12 часов.

Срок службы — календарная продолжительность эксплуатации от начала эксплуатации объекта или ее возобновления после ремонта до перехода в предельное состояние.

Назначенный ресурс — суммарная наработка, при достижении которой эксплуатация должна быть прекращена независимо от его технического состояния.

Назначенный срок службы — календарная продолжитель-

ность эксплуатации, при достижении которой эксплуатация объекта должна быть прекращена независимо от его технического состояния. При достижении объектом назначенного ресурса (назначенного срока службы) в зависимости от его состояния может быть принято решение о продолжении эксплуатации или о ее прекращении.

3.1.4. Техническое обслуживание и ремонт

Техническое обслуживание — комплекс операций или операция по поддержанию работоспособности или исправности изделия при использовании по назначению, ожидании, хранении и транспортировании.

Восстановление — процесс перевода объекта в работоспособное состояние из неработоспособного.

Ремонт — комплекс операций по восстановлению исправности или работоспособности изделий и восстановлению ресурсов изделий или их составных частей.

Схема основных состояний и событий объекта, а также перехода в различные состояния показана на рис. 3.1.



Рис. 3.1. Схема основных состояний и событий: 1 — повреждение; 2 — отказ; 3 — переход объекта в предельное состояние; 4 — восстановление; 5 — ремонт

3.2. Выбор номенклатуры нормируемых показателей надежности

3.2.1. Показатели надежности

Показатель надежности — количественная характеристика одного или нескольких свойств, составляющих надежность объекта.

Показатели безотказности:

Вероятность безотказной работы — вероятность того, что в пределах заданной наработки отказ объекта не возникает.

Гамма — *процентная наработка до отказа* — наработка, в течение которой отказ объекта не возникает с вероятностью γ , выраженной в процентах. Поясним это с помощью рис. 3.2, где точками на оси отложено время отказа десяти испытывавшихся приборов.

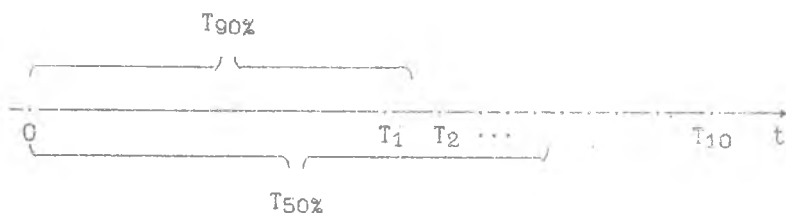


Рис. 3.2. Пояснения к вопросу о гамма-процентной наработке до отказа

На этом рисунке правая граница интервала времени $T_{90\%}$, соответствующего 90-процентной наработке до отказа элемента, расположена между первой T_1 и второй T_2 точками на оси.

Средняя наработка до отказа — математическое ожидание наработки объекта до первого отказа. Она соответствует 50-процентной наработке до отказа (см. рис. 3.2).

Интенсивность отказов. Этот показатель надежности рассматривается в подразделе «Надежность как качество, развернутое во времени» раздела «Методы расчета показателей надежности элементов» основного курса лекций по надежности ЛА.

Далее приведем названия показателей надежности без их определения, т. к. суть этих показателей ясна из названия.

Показатели долговечности:

гамма — процентный ресурс;

средний ресурс;

гамма — процентный срок службы;

средний срок службы и др.

Показатели ремонтпригодности:

вероятность восстановления (за время, не более заданного) работоспособного состояния;

гамма — процентное время восстановления и т. п.

Показатели сохраняемости:

гамма — процентный срок сохраняемости;

средний срок сохраняемости и т. п.

Комплексный показатель надежности характеризует несколько свойств, составляющих надежность объекта.

Применительно к космическим комплексам (аппаратам) комплексные показатели надежности подразделяют на обобщенные, основные и дополнительные.

Обобщенный показатель надежности — показатель, характеризующий надежность объекта в целом на всех периодах функционирования при заданных способах и условиях его применения.

Основной показатель надежности — характеризует надежность объекта на отдельном периоде его функционирования.

Дополнительные показатели надежности используют для решения частных задач обеспечения и контроля надежности объекта.

Рассмотрим некоторые из показателей надежности космических аппаратов или комплексов.

3.2.2. Обобщенные показатели надежности

Вероятность обеспечения в течение времени активного существования суточного относительного выходного эффекта не ниже заданного уровня имеет вид

$$P_{ка}(E_{сут} \geq E_{сут}^{тp}, T_{ac}) = M[S / S_0], \quad (3.1)$$

где $P(\cdot)$ — символ вероятности;

$E_{сут}$ — суточный выходной эффект;

$E_{сут}^{тp}$ — требуемый суточный выходной эффект;

T_{ac} — время активного существования;

$M[\cdot]$ — операция математического ожидания;

S — число суток, в которых КА нормально работал;

S_0 — время активного существования в сутках.

Например, $P_{ка}(E_{сут} \geq 80\%, T_{ас} = 3г) = 0,735$, что читается следующим образом: вероятность получения объектом суточного выходного эффекта более 80 % за 3 года существования равна 0,735.

Коэффициент *готовности* — вероятность того, что объект окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени, кроме планируемых периодов, в течение которых применение объекта по назначению не предусматривается.

Стационарное значение коэффициента готовности определяется по следующей формуле;

$$K_e^{kc} = \frac{T_0 - \sum t_i^{np.n.}}{T_0}, \quad (3.2)$$

где T_0 — время функционирования;

$\sum t_i^{np.n.}$ — сумма времени простоя (неплановое).

Например, $K_e^{kc} = 0,91$ при выходном эффекте не менее 85%.

Коэффициент *технического использования* — отношение математического ожидания суммарного времени пребывания объекта в работоспособном состоянии за некоторый период эксплуатации к математическому ожиданию суммарного времени пребывания объекта в работоспособном состоянии и простоев, обусловленных техническим обслуживанием и ремонтом за тот же период.

Стационарное значение коэффициента технического использования выражается следующим образом:

$$K_{mi} = \frac{M[\sum t_p]}{M[\sum t_p + \sum t_{np.n.}]}, \quad (3.3)$$

где $M[\cdot]$ — символ математического ожидания;

t_p — время работы;

$t_{пр.п.}$ — время простоев (плановое);

\sum — символ суммы.

Например, $K_{ти} = 0,82$ за время эксплуатации $T_э = 2$ года.

Основное отличие коэффициентов готовности и техническоего использования состоит в учете или неучете планового и непланового времени простоя.

Коэффициент *сохранения эффективности* — отношение значения показателя эффективности использования объекта по назначению за определенную продолжительность эксплуатации к номинальному значению этого показателя, вычисленному при условии, что отказы объекта в течение того же периода не возникают.

Стационарное значение этого коэффициента определяется следующим образом:

$$K_{сэ} = \frac{\mathcal{E}_д}{\mathcal{E}_{ном}} \quad \text{за время } T_э, \quad (3.4)$$

где $\mathcal{E}_д$ — показатель действительной эффективности;

$\mathcal{E}_{ном}$ — показатель номинальной эффективности;

$T_э$ — время эксплуатации.

Например, $K_{сэ} = 0.85\%$ за время $T_э = 3$ г.

3.2.3. Основные показатели надежности

Рассмотренные выше обобщенные комплексные показатели надежности могут использоваться не только для всего периода активного существования КА, но и для отдельных периодов функционирования. В этом случае они будут называться основными показателями надежности. Кроме того, для характеристики свойств надежности на отдельных периодах функционирования применяются и другие показатели.

Пример выбора основных показателей надежности для КА наблюдения показан в табл. 3.1.

Показатели надежности КА

Период функционирования	Основные показатели надежности
1. Хранение	Средний срок сохраняемости. Гамма-процентный срок сохраняемости
2. Дежурство	Вероятность нахождения КА в состоянии готовности (коэффициент готовности)
3. Подготовка и выведение на орбиту	Среднее время подготовки к пуску. Гамма-процентное время подготовки к пуску и т. п.
4. Выведение на орбиту	Вероятность безотказной работы функционирующих систем в течение времени выведения
5. Функционирование на орбите (для КА постоянно функционирующего):	Средний срок активного существования. Гамма-процентный срок активного существования
— Нахождение в готовности к приему и обработке видеoinформации	Вероятность нахождения в состоянии готовности
— Нахождение в орбитальном резерве	Вероятность сохранения работоспособного состояния в течение заданного времени. Гамма-процентный срок сохраняемости в орбитальном резерве
— Целевая работа:	Вероятность обеспечения заданного уровня выходного эффекта
наблюдение	Вероятность нахождения местоположения цели
обслуживание заявок	Коэффициент оперативной готовности
прием и передача видеoinформации на Землю	Вероятность своевременного и качественного приема и передачи информации
— Профилактическое обслуживание и ремонт на орбите	Среднее время восстановления. Гамма-процентное время восстановления
6. Функционирование на орбите для КА периодического функционирования	Вероятность выполнения программы полета

3.2.4. Дополнительные показатели надежности

В качестве дополнительных показателей надежности можно использовать показатели безотказности, долговечности, ремонтпригодности и сохраняемости, если их применять к частным задачам, выполняемым КА, и к отдельным устройствам и системам КА. Например, среднее время разворачивания КС, ресурс двигательной установки и т. п.

Для каждого типа космического аппарата могут быть выбраны или назначены свои показатели надежности.

3.3. Технико-экономическое обоснование значений показателей надежности космического комплекса и его составных частей

3.3.1. Нормирование надежности космического комплекса

Надежность космического комплекса (КК) существенно влияет на его эффективность. Снижение надежности КК ведет к уменьшению выходного эффекта.

Для установления показателей надежности КК необходимо построить зависимость выходного эффекта КК от его надежности, как это схематично показано на рис.3.3,а.

Минимальное значение показателя надежности находят из условия допустимого уровня потери выходного эффекта

$$\Delta E = E_0 - E_{\text{доп}}(P), \quad (3.5)$$

где E_0 — выходной эффект при абсолютной надежности комплекса,

$E_{\text{доп}}(P)$ — допустимый выходной эффект.

Оптимальное значение показателя надежности КК зависит от его специфики. Рассмотрим некоторые варианты комплексов.

Вариант 1. Выходной эффект и затраты на создание КК — величины одного и того же вида (стоимость). На рис.3.3,а показаны условные графики изменения выходного эффекта $E(P)$ и стоимости $C(P)$ создания КК в зависимости от показателя надежности комплекса.

Функцию разности между эффектом и стоимостью можно принять за целевую, по которой ищется оптимальное значение надежности, то есть

$$W(P) = E(P) - C(P). \quad (3.6)$$

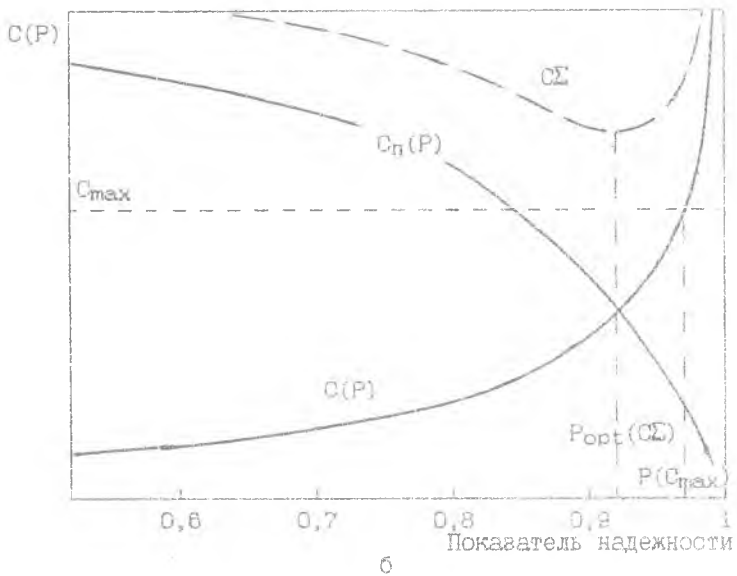
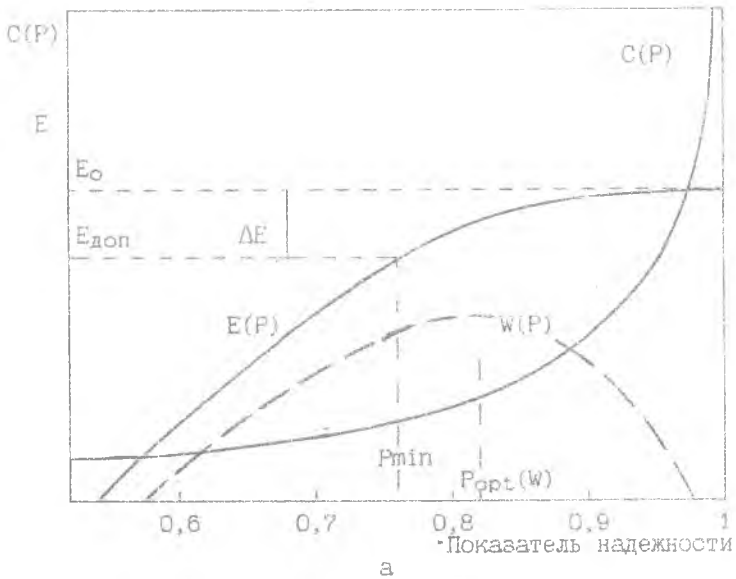


Рис. 3.3. Нормирование показателей надежности

Кривая $W(P)$ показана на рис.3.3,а пунктирной линией. Максимум $W(P)$ соответствует оптимальному значению показателя надежности $P_{opt}(W)$.

Если важно получить максимум эффекта на единицу затраченных средств (относительный эффект), то вычисляют отношение

$$K = \frac{E(P)}{C(P)} \quad (3.7)$$

и принимают его за целевую функцию, по которой можно построить критерий определения оптимальных значений надежности составляющих частей КК.

Стоимость создания КК иногда аппроксимируют следующей формулой

$$C(P) = \frac{C_0 \ln(1 - P)}{\ln(1 - P_0)} \quad (3.8)$$

где C_0 и P_0 — соответственно стоимость и показатель надежности прототипа.

Представить эффект в виде стоимости можно для некоторых типов КК, например, для комплекса телевизионной ретрансляции.

Вариант 2. Эффект КК выразить в единицах измерения стоимости невозможно, а стоимость потерянных аппаратов выразить в единицах стоимости можно. Этот вариант показан на рис.3.3,б условной кривой $C_n(P)$. К этой группе можно отнести, например, комплексы для исследования планет солнечной системы.

Если сложить стоимость КК и стоимость потерянных аппаратов, то эту сумму можно принять за критерий оптимизации

$$C \Sigma = C_n(P) + C(P). \quad (3.9)$$

Оптимальным должен быть показатель надежности космического комплекса P_{opt} , который соответствует минимуму функции (3.9). Следует отметить, что оптимальные показатели надежности для разных критериев не совпадают.

Вариант 3. Эффект выразить в единицах измерения нельзя или сложно, а стоимость потерянной информации громадна, но не поддается расчету, например, для спутников военной развед-

ки. Тогда вместо оптимального значения надежности берут показатель, соответствующий максимально возможному выделению средств (C_{\max}) на создание КК и определяют надежность $P(C_{\max})$, которую при этом можно обеспечить. Этот вариант также показан на рис. 3.3.6.

3.3.2. Нормирование надежности составных частей космического комплекса

Основным принципом нормирования является системный подход. Приведем порядок действий при нормировании составных частей КК.

1. Производят декомпозицию КК на составные части. Представляют комплекс в виде иерархической структуры, состоящей из элементов, технические и эксплуатационные характеристики которых являются независимыми. Один из возможных способов декомпозиции был показан на рис. 2.1.

2. Определяют зависимость надежности комплекса $P_{\text{КК}}$ от показателей надежности составных элементов P_i , т. е. функцию

$$P_{\text{КК}} = P_{\text{КК}}(P_1, P_2, \dots, P_1, \dots, P_N), \quad (3.10)$$

где N — количество элементов комплекса.

3. На функцию (3.10) и ее составные части накладывают необходимые ограничения (на величину показателя, расход ресурсов, массу элементов и систем).

4. Находят оптимальные значения показателей надежности элементов, при которых достигается максимальное значение функции (3.10) с учетом введенных ограничений.

5. Если максимальное значение функции (3.10) не совпадает с показателем надежности комплекса, назначенного при его нормировании, то решается вопрос либо о резервировании элементов комплекса, либо о послаблении требований к надежности составных элементов комплекса.

Методы отыскания функций типа (3.10) рассматриваются в соответствующих разделах курса надежности КА.

3.3.3. Нормирование надежности бортовых систем космических аппаратов

Нормирование надежности бортовых систем космических аппаратов производится по той же процедуре, что и в п.3.3.2, но с некоторыми особенностями, которые и рассмотрим здесь.

Пример декомпозиции КК по бортовым системам и конструктивным отсекам был приведен на рис.2.2.

После определения зависимости надежности КА ($P_{ка}$) от надежности бортовых систем и отсеков ($P^{(j)}$) имеем

$$P_{ка} = P_{ка}(P^{(1)}, P^{(2)}, \dots, P^{(j)}, \dots, P^{(m)}), \quad (3.11)$$

где m — количество рассматриваемых систем.

Далее отыскиваются по статистике (из прототипов) или назначаются зависимости надежности бортовой системы от их массы

$$P^{(j)} = P^{(j)}(\Delta M_j), \quad (3.12)$$

где ΔM_j — масса конструкции бортовой системы.

Далее вводят ограничения по массе

$$\sum_{j=1}^m \Delta M_j \leq M, \quad (3.13)$$

где M — масса всего аппарата.

Решают оптимизационную задачу, в которой достигается максимум функции (3.11) при ограничениях (3.12) и функциях связи (3.13).

Полученные значения аргументов функции (3.11) и будут оптимальными.

Если в проектируемом КА используются заимствованные системы, характеристики которых по надежности и по массе известны, то их параметры в уравнениях (3.11)–(3.13) рассматриваются фиксированными.

При недостижимости значения показателя надежности $P_{ка}$, полученного при нормировании надежности космических комплексов, решается вопрос о резервировании систем или о повышении требований к разрабатываемым системам. В крайнем случае констатируется факт недостижимости требуемой надежности КА при современном уровне техники.

3.3.4. Нормирование надежности составных частей бортовых систем КА

Нормирование надежности составных частей бортовых систем КА производится аналогично, что и при нормировании надежности самих систем. На рис.3.4 показана декомпозиция системы обеспечения теплового режима КА (СОТР КА).



Рис. 3.4. Декомпозиция системы СО2Р КА

Декомпозицию осуществляют до уровня, при котором выполняются следующие условия:

1. Показатели надежности элементов известны (например, паспортные данные).
2. Показатели надежности можно рассчитывать известными методами.
3. Показатели надежности можно определить только из эксперимента.

При проектировании КА, как упоминалось, установить оптимальное значение показателей эффективности и надежности не всегда удается. Это связано, во-первых, с наличием определенных ограничений (массовых, стоимостных, временных и т. п.), во-вторых, с использованием уже разработанных ранее систем, подсистем, элементов, у которых уже известны показатели надежности и эффективности.

Процесс нормирования показателей надежности КК, КА, бортовых систем и их составных частей является итерационным.

При этом он неразделим с обратным процессом, а именно с процессом прогнозирования надежности изделий при проектировании. Перебирая различные варианты состава КА, можно прогнозировать его надежность и приблизиться к оптимальным показателям надежности. В этом случае показатели принято

называть рациональными.

Методы расчета показателей надежности элементов и систем рассматриваются в других разделах курса надежности КА.

3.4. Задание требований по надежности проектируемых КА

При проектировании КА необходимо установить требуемые показатели надежности. На самой начальной стадии проектирования показатель надежности КА назначают по изделиям аналогам, а по мере накопления данных в процессе длительного проектирования эти показатели уточняются.

Приведем проектные значения надежности некоторых типов космических аппаратов.

Аполлон -- 95% -- вероятность выполнения задания;

99,9% -- вероятность спасения экипажа.

Шаттл -- 96,7% -- вероятность выполнения задания.

Гермес -- 98% -- вероятность выполнения задания;

99,95% -- вероятность спасения экипажа.

Надежность КА существенно зависит от времени активного существования.

Так для спутника типа «Бион», «Ресурс», время эксплуатации которого 14 суток, надежность равна 95%, а для метеоспутников с временем активного существования полгода--год она может быть порядка 65%.

Надежность долговременных обитаемых станций поддерживается соответствующим техническим обслуживанием и ремонтом.

Ниже в табл. 3.2 и 3.3 приведены данные по надежности ракетно-космической техники, которые заимствованы из работы [19], где используется наиболее простой показатель надежности космической техники, а именно процент успешных пусков или полетов.

Задание требований к точности и достоверности исходных данных по надежности зависит от количества испытаний и отказов изделий аналогов. Это делается с помощью оценки доверительных границ. Методы оценки доверительных границ рассматриваются в соответствующих разделах курса надежности КА.

Таблица 3.2

Результаты пусков с 1.01.79 по 1.04.89

Типы РН	Всего пусков	Неудачных	Точечная оценка надежности, %
Протон	132	10	92,4
Союз	578	12	97,9
Восток	92	1	98,9
Молния	193	10	94,8
Космос	333	14	95,8
Циклон	75	2	97,3
Зенит	21	0	100
Энергия	2	0	100

Таблица 3.3

Надежность основных знаальных РН

Ракеты	Всего пусков	Неудачных	Точечная оценка надежности, %
Space Shuttle	30	1	96,7
Titan	141	6	95,7
Ariane	33	1	87,8
Atlas-Centaur	67	11	84,8
Delta	187	12	93,6
Scout	112	14	87,5
Сатурн V	33	0	100

4. ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ НА РАЗЛИЧНЫХ ЭТАПАХ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Работы по обеспечению надежности КА (КК) планируют и проводят в соответствии со следующими программами:

- программа обеспечения надежности (ПОН),
- комплексная программа экспериментальной отработки (КПЭО);

-- программа повышения надежности (ППН).
Рассмотрим эти программы последовательно.

4.1. Программы обеспечения надежности

Типовая структура и содержание ПОН изложены ниже.

1. Анализ требований по надежности, оценка их принципиальной выполнимости, выбор изделий аналогов.
2. Анализ организационно-технических требований.
3. Выявление изделий, лимитирующих надежность КК.
4. Составление перечня возможных отказов (на этапе эскизного проектирования).
5. Анализ возможных отказов (на этапах технического проектирования, экспериментальной отработки и эксплуатации).
6. Состав перечня возможных нештатных ситуаций.
7. Обоснование различных видов резервирования.
8. Перечень расчетно-теоретических работ.
9. Перечень экспериментальных работ (который развивается затем в КПЭО).
10. Контрольные сроки и порядок контроля.
11. Финансы.

Рассмотрим некоторые пункты этой программы подробнее.

4.1.1. Анализ возможных отказов

Основная цель — создание КА, способного в условиях появления отказов выполнить поставленную задачу.

Основные задачи:

- выявить элементы, отказы которых снижают надежность и эффективность применения КА;
- заранее предусмотреть меры по предотвращению отказов и их распознаванию по контрольной информации;
- разработать алгоритм управления КА в аварийных ситуациях.

4.1.2. Обоснование различных видов резервирования

Резервирование — способ обеспечения надежности объекта за счет использования дополнительных средств или возможностей, избыточных по отношению к минимально необходимым для выполнения требуемых функций. Например, если система ориентации КА содержит четыре силовых гироскопа, а для работос-

способности КА достаточно трех гиросколов, то четвертый является резервным.

Нагруженный резерв — резерв, который содержит один или несколько резервных элементов, находящихся в режиме основного элемента. Например, два температурных датчика в одной магистрали системы обеспечения теплового режима (СОТР). Условно нагруженный резерв можно изобразить так, как это показано на рис. 4.1, где прямоугольниками обозначены элементы 1 и 2.



Рис. 4.1. Нагруженный и ненагруженный резервы

Ненагруженный резерв отличается от нагруженного тем, что резервный элемент не включен до момента выполнения им функций основного элемента (рис. 4.1, б).

Схемы *общего* и *раздельного* резервирования показаны на рис. 4.2 и 4.3. При общем резервировании резервируется целиком объект, а при раздельном — отдельные составляющие элементы этого объекта.

При *скользящем* резервировании резервный элемент может заменить любой из отказавших элементов группы, как это схематично показано на рис. 4.4.

Мажоритарное резервирование — метод повышения надежности с применением принципа «голосования». Например, «Спейс

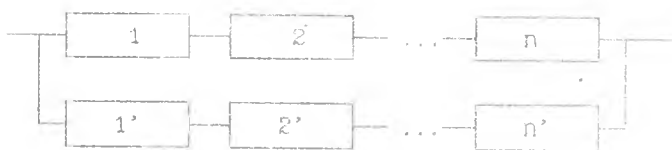


Рис. 4.2. Общее резервирование



Рис. 4.3. Раздельное резервирование

Шаттл» содержит 5 ЭВМ, решение о выполнении той или иной команды принимается, когда команду выдадут не менее трех ЭВМ.

Толерантное резервирование. Система называется толерантной, если для обнаружения локализации и устранения собственных неисправностей она не требует вмешательства человека. Например, толерантность бортовых вычислительных систем «Спейс Шаттл» достигается при использовании одновременно трех форм избыточности: аппаратной, программной и временной.

Программная избыточность реализуется:

- дублированием в памяти особо важных программ и данных;
- тестовыми и диагностическими программами на различном программном уровне;
- избыточность, которая наряду с другими функциями должна способствовать возможности осуществления повторного запуска рабочих программ.

Временная избыточность преследует две цели:

- возможность обнаружить ошибку с помощью вторичного выполнения программы;
- возможность восстановить вычислительный процесс после обнаружения ошибки.

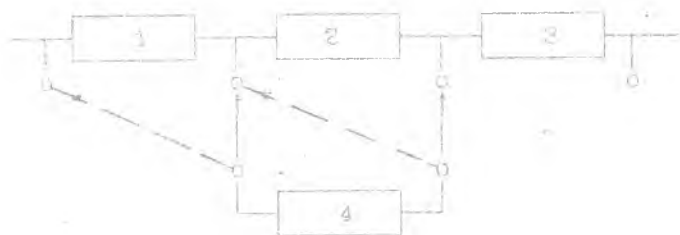


Рис. 4.4. Скользящее резервирование

Функциональное резервирование это резервирование, при котором функции отказавшего элемента передаются другому элементу, выполняющему эти функции другими способами. Например, при отказе спутника ретранслятора передача видеонформации может вестись на наземные пункты приема. При отказе гироскопа датчика направления осей ориентации КА ориентацию можно проводить с помощью интегратора угловых скоростей.

Следует отметить, что при использовании резервирования (кроме нагруженного) следует учитывать надежность переключающих устройств, что оценивается с помощью показателя вероятности успешного перехода на резерв за время, не превышающее заданное.

Поскольку космический аппарат является сложным роботом, то возможно в принципе использование методов резервирования, заложенных в живой природе. Приведем выдержки из работы [20].

«В организме на всех уровнях существует избыток структурных элементов, выполняющих ту или иную функцию. Например, нейронов глазного нерва, управляющего движением глаза, в организме 25 тысяч, а в обычных условиях используется лишь 4 тысячи. И так, во всем есть избыток функционирующих элементов, каналов связи (нервов), управляющих систем (например, 13 гормонов вызывают сокращение легочной артерии, 7 — ее расслабление). Увеличение нагрузки компенсируется не ростом действующих элементов, не усилением режима их работы, а именно подключением дополнительных элементов. И те и другие при этом действуют без перегрузки.

Болезни происходят тогда, когда достигается предел возможностей резервирования. Отдельные элементы, правда, восстанавливаются или заменяются новыми. В особых случаях функции вышедшей структуры принимают на себя резервные. Так, при удалении селезенки лимфатические узлы брызжейки становятся и узлами кроветворения».

4.2. Комплексная программа экспериментальной отработки

Комплексная программа экспериментальной отработки (КПЭО), как упоминалось, на начальной стадии жизненного цикла КА является составной частью программы обеспечения надежности, затем на более поздних стадиях она является

самостоятельной и предназначена для экспериментальной отработки надежности изделий.

Эти испытания в зависимости от контролируемых (оцениваемых) свойств, составляющих надежность, могут включать испытания на безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость как отдельных систем, так и КА в целом.

Испытания, проводимые для определения показателей надежности с заданными точностью и достоверностью, принято называть *определятельными* испытаниями на надежность.

Рассмотрим структуру КПЭО. Она состоит из двух разделов. Первый раздел содержит следующие пункты:

1. Состав и структура изделия.
2. Характеристика степени новизны

$$K_n = \frac{N_n}{N_n + N_z}$$

где N_n — количество новых составляющих частей и элементов КА;

N_z — количество заимствованных составляющих.

3. Перечень изделий, подвергаемых наземным автономным испытаниям (НАИ) и наземным комплексным испытаниям (НКИ), а также другим видам испытаний.

4. Место проведения испытаний.
5. Анализ достаточности экспериментальной базы.

Если в создаваемом КА заимствованных элементов нет ($K_n = 1$), то испытаниям подвергается все системы и элементы, если КА содержит много заимствованных элементов ($K_n \rightarrow 0$), то испытания проводят по усеченной программе.

Второй раздел включает типовые экспериментальные работы и порядок их проведения. Приведем некоторые виды экспериментальных работ:

1. Макетно-конструкторские.
2. Испытания на статическую прочность.
3. Вибрационные (динамические) испытания.
4. Тепловакуумные испытания.
5. Наземно-технологические.
6. Испытания на транспортабельность.
7. Испытания на сохраняемость.
8. Испытания на работоспособность.

9. Испытания на техническом комплексе.

10. Испытания на стартовом комплексе.

11. Летные испытания.

Для проведения этих и других работ создается специальное оборудование и стенды. Например, для проведения вибрационных испытаний необходимо создать мощные динамические стенды. Для тепловакуумных испытаний необходимо создать вакуумные установки больших габаритов с имитацией солнечного спектра освещения или с имитацией температур на корпусе КА, возникающих при спуске с орбиты.

Кроме работ, проводимых на стадии отработки изделий, проводятся периодически некоторые виды испытаний на стадии серийного производства.

4.3. Программа повышения надежности

ППН составляется и реализуется на стадии серийного производства и эксплуатации КА. Причины появления ППН следующие.

1. Отказы и аварийные ситуации.

2. Изменение элементной базы.

Отказы и аварийные ситуации могут быть как вследствие незамеченных ошибок проектирования, так и вследствие нарушения технологии производства.

Так, катастрофа с Челленджером произошла вследствие несовершенства конструкции стыков блоков твердотопливных ускорителей, после чего программа полетов на других подобных аппаратах была приостановлена более чем на год с целью изменения конструкции ненадежных узлов.

Было принято решение выводить космические грузы в этот период с помощью ракет-носителей, которые не эксплуатировались уже долгое время. Однако при их запуске были отказы, причина которых заключалась в нарушении технологии производства.

В свою очередь нарушение технологии производства может происходить при смене оборудования или кадров, а также вследствие фактора психологического привыкания к опасности или ответственности за свои действия исполнителей на рабочих местах.

Так, отказы одного из двигателей конструкции Н.Д. Кузнецова были связаны с тем, что вместо женщины, которая полировала

лопатки турбины, на эту операцию был поставлен мужчина, который вел обработку поверхностей лопатки интенсивнее, что в свою очередь приводило к появлению микротрещин.

Отдельные отказы при запусках ракеты-носителя «Союз» были связаны с тем, что некоторые исполнители, много лет выполнявшие одну и ту же работу, стали работать без чертежей, «по памяти» и сделали брак, который контролеры также не заметили.

Изменение элементной базы требует модернизации изделия, которая проводится также согласно ППН.

Например, после смены в КА «Союз-Т» некоторых приборов, кабелей и другого оборудования ему присвоили индекс «Союз-ТМ» и он мог вместить 3 космонавтов в скафандрах вместо двух на Союзе-Т.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в настоящем конспекте лекций изложены основные методические и организационно-технические вопросы надежности космических аппаратов.

В то же время много вопросов осталось вне поля нашего зрения. Желающих более глубоко изучить вопросы, связанные с надежностью изделий, можно отослать к литературе, обзор которой приведен в первом разделе.

Следует также отметить, что создание надежных изделий космической техники в значительной степени определяется опытом работы конструкторских бюро, заводов, эксплуатирующих организаций, их кооперацией и взаимодействием соответствующих служб.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Надежность и эффективность в технике: Справочник: В 10 т. М.: Машиностроение, 1986.
2. Кузнецов А.А. Надежность конструкций баллистических ракет. М.: Машиностроение, 1978.
3. Волков Л.И., Шишкевич А.М. Надежность летательных аппаратов. М.: Высшая школа, 1975.
4. Волков Л.И. Управление эксплуатацией летательных комплексов. М.: Высшая школа, 1987.
5. Анцелиович Л.Л. Надежность, безопасность и живучесть самолета. М.: Машиностроение, 1985.
6. Золотов А.А., Титов М.И. Обеспечение надежности транспортных аппаратов космических систем. М.: Машиностроение, 1988.
7. Лебедев А.А., Нестеренко О.П. Проектирование космических аппаратов наблюдения. М.: Машиностроение, 1991.
8. Ханцеверов Ф.Р., Остроухов В.В. Моделирование космических систем изучения природных ресурсов Земли. М.: Машиностроение, 1989.
9. Капур К., Ламберсон Л. Надежность и проектирование систем /Пер с англ. М.: Мир, 1980.
10. Диллон Б., Сингх Ч. Инженерные методы обеспечения надежности систем /Пер. с англ. М.: Мир, 1984.
11. Рябинин И.А., Черкесов Г.И. Логико-вероятностные методы исследования надежности структурно-сложных систем. М.: Радио и связь, 1981.
12. Болотин В.В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций. М.: Машиностроение, 1984.
13. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. М.: Наука, 1969.
14. Кузнецов А.А. Математическое обеспечение надежности ЛА. М.: МАИ, 1982.
15. Лукашев Л.Г., Куренков В.И. Надежность систем конструкций летательных аппаратов. Куйбышев: КУАИ, 1986.
16. Справочник по безопасности космических полетов: /Г.Т. Береговой, В.И. Яропалов, И.И. Баранецкий и др. М.: Машиностроение, 1989.
17. Степанов С.Л., Тимшин В.Т., Юмашев Л.П. Космическая среда и условия пребывания в ней летательных аппаратов. Куйбышев: КУАИ, 1986.
18. Боевая живучесть летательных аппаратов /С.И. Базазянц, А.Н. Меднов, А.Ф. Букиин и др. /Под ред. В.Ф. Леонтьева. М.: Военное издательство, 1988.
19. Надежность ракетной техники. Астронавтика и ракетодинамика: Экспресс-информация. М.: ВИНТИ, 1990, N15, с. 20-24.
20. Федоров В. Избыточность функционирующих структур -- фундаментальный фактор надежности физиологических систем // Успехи современной биологии, Т. 105, Вып. 2, 1988.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
1. Краткий обзор литературы по надежности	4
2. Место и роль надежности в структуре сложной технической системы	6
2.1. Космический аппарат как сложная техническая система	6
2.2. Качество, эффективность и надежность — важнейшие свойства сложных технических систем	8
2.3. Надежность космических комплексов и аппаратов	11
2.4. Изменение надежности КА в процессе жизненного цикла	12
2.5. Этапы эксплуатации и периоды функционирования КА	14
3. Нормирование надежности	15
3.1. Критерии отказов, повреждений и предельных состояний	16
3.2. Выбор номенклатуры нормируемых показателей надежности ..	20
3.3. Техничко-экономическое обоснование значений показателей надежности космического комплекса и его составных частей	25
3.4. Задание требований по надежности проектируемых КА	31
4. Обеспечение надежности на различных этапах жизненного цикла космических аппаратов	32
4.1. Программа обеспечения надежности	33
4.2. Комплексная программа экспериментальной обработки	36
4.3. Программа повышения надежности	38
З а к л ю ч е н и е	39
Б и б л и о г р а ф и ч е с к и й с п и с о к	40

Учебное издание

Куренков Владимир Иванович
Кузнецов Владимир Иванович
Сайгак Владимир Михайлович

МЕТОДИЧЕСКИЕ И ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКИЕ
ВОПРОСЫ НАДЕЖНОСТИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ
КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ

Редактор Т.И.Кузнецова
Техн. редактор Г.А. Усачева
Корректор Т.И. Щелокова

Лицензия ЛР N 020301 от 30.12.96.

Подписано в печать 30.01.97. Формат 60x84 1/16.
Бумага газетная. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 2,56. Усл. кр.-отт. 2,68. Уч.-изд. л. 2,75.
Тираж 100 экз. Заказ **87**. Арт. С-1/97.

Самарский государственный аэрокосмический университет
им. академика С.П.Королева:
443086 Самара, Московское шоссе, 34

ИПО Самарского государственного аэрокосмического
университета, 443001 Самара, ул. Молодогвардейская, 151.