

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АКАДЕМИКА С.П. КОРОЛЕВА
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»

В. И. Куренков, В. В. Волоцув

**Надёжность изделий и систем
ракетно-космической техники**

Электронный курс лекций

САМАРА

2010

УДК 629.7.017.1 (075)

Авторы: **Куренков Владимир Иванович,**
Волоцув Владимир Валерьевич

Изложен конспект лекций в соответствии с рабочей программой дисциплины «Надёжность изделий и систем ракетно-космической техники».

Рассматривается исторический аспект надёжности ракетно-космических комплексов (РКТ). Анализируется соотношение категорий надёжности и эффективность сложных технических систем, в частности систем РКТ. Подробно рассматриваются вопросы терминологии и определений надёжности сложных технических систем и систем и изделий РКТ.

Конспект лекций предназначен для студентов направления 160400.68 «Ракетные комплексы и космонавтика» направления подготовки по магистерской программе «Проектирование и конструирование космических мониторинговых и транспортных систем».

Разработан на кафедре летательных аппаратов СГАУ. Он может быть полезен молодым специалистам ракетно-космической отрасли.

Ил. 24. Табл. 12. Библиогр.: 66 назв.

© Самарский государственный
аэрокосмический университет, 2010

ОГЛАВЛЕНИЕ

1. ИСТОРИЧЕСКИЙ АСПЕКТ НАДЕЖНОСТИ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ	5
1.1. История появления и развития методов количественной оценки надежности технических систем	5
1.2. Надежность ракетной техники.....	7
1.3. Надежность космической техники	11
1.4. Краткий обзор современной литературы по надежности	13
1.5. Объем изучаемых вопросов	17
1.6 Контрольные вопросы	18
2. НАДЕЖНОСТЬ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ	19
2.1. Структура ракетно-космического комплекса	20
2.2. Эффективность системы	24
2.3. Надежность системы.....	29
2.4. Изменение надежности ракетно-космического комплекса в процессе жизненного цикла	30
2.5 Контрольные вопросы	36
3. ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ.....	37
3.1. Основные технические состояния	37
3.2. Дефекты, повреждения, отказы	38
3.3. Временные понятия	40
3.4. Техническое обслуживание и ремонт	41
3.5. Общетехнические показатели надежности.....	42
3.6. Термины и определения надежности космических комплексов и ракетно-космических систем	43
3.7. Показатели надежности космических комплексов и ракетно-космических систем	45
3.8 Контрольные вопросы	49
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	50
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	51

ВВЕДЕНИЕ

В связи с широким внедрением расчета надежности в практику проектирования изделий и систем ракетно-космической техники магистрант должен знать историю становления надежности ракетно-космических комплексов, основные положения теории надежности, понимать отличие категорий надежности и эффективности, знать терминологию и основные определения надежности сложных технических систем и систем и изделий РКТ.

Конспект лекций предназначен для студентов специальности 160400.68 «Ракетные комплексы и космонавтика» направления подготовки по магистерской программе «Проектирование и конструирование космических мониторинговых и транспортных систем».

Цель настоящих методических указаний — оказать помощь обучающимся в приобретении знаний по дисциплине «Надежность изделий и систем ракетно-космической техники» в рамках отведённых часов лекционных занятий.

Практикум включает три двухчасовых темы.

В первой теме рассматриваются вопросы, касающиеся истории появления и развития методов количественной оценки надежности технических систем, вопросы надежности ракетно-космической техники. Рассматривается краткий обзор современной литературы по надежности, нормативным документам ракетно-космической отрасли и стандарты.

Во второй теме рассматриваются вопросы структуры ракетно-космического комплекса, соотношения надежности и эффективности сложных технических систем, вопросы изменения надежности изделий и систем РКТ в процессе жизненного цикла.

В третьей теме рассматриваются вопросы терминологии надежности, в частности, понятия, связанные с изменением надежности во времени, вопросы технического обслуживания и ремонта, общетехнические показатели надежности и показатели надежности систем и изделий РКТ.

Во всех темах приведены примеры, облегчающие усвоение материала, и контрольные вопросы, необходимые для закрепления полученных навыков.

1. ИСТОРИЧЕСКИЙ АСПЕКТ НАДЕЖНОСТИ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

1.1. История появления и развития методов количественной оценки надежности технических систем

В течение длительного времени понятие надежности носило, по существу, интуитивный, субъективный и качественный характер. Метод расчета надежности как вероятностной прочности конструкции был разработан в 1926-1929 гг. Н. Ф. Хоциаловым и М. Майером, но развивался слабо [24]. Первые работы в этом направлении не получили широкого одобрения, не нашли применения в практике и не вышли за границы дискуссионного характера.

Первые статьи, посвященные оценке надежности систем энергетики, в отечественной литературе появились лишь в середине 30-х годов 20 века, однако это направление стало сразу бурно развиваться.

По сравнению с теорией надежности систем энергетики теория надежности механических систем вначале развивалась более медленными темпами. Лишь работы Н. С. Стрелецкого в конце 30-х и середине 40-х годов и послевоенные работы А. Р. Ржаницына и Я. Б. Шора [1], а также других ученых стали постепенно прокладывать этому направлению путь в практику.

Необходимость в количественной оценке надежности особенно остро стала ощущаться в годы второй мировой войны. Внимание к анализу надежности явилось косвенным следствием проблем, связанных с разработкой в начале 40-х годов 20-го века радиоэлектронных систем наших союзников в войне, предназначенных для военных целей.

По мере усложнения этих систем возрастали проблемы, связанные с радиоэлектронным оборудованием, что побудило военно-воздушные силы и сухопутные войска США учредить комитеты для исследования вопросов надежности. В 1952 году Министерство обороны США скоординировало их деятельность и организовало консультативную группу по вопросам надежно-

сти радиоэлектронной аппаратуры.

Развитие теории надежности в нашей стране можно отнести к концу 50-х годов 20 века. Именно с этого времени советская школа теории надежности заняла ведущие позиции в мире.

Интенсивное развитие военной, а затем и космической техники привело к созданию современной теории надежности, широко использующей количественные показатели. Такие показатели можно задавать, анализировать, измерять как конструктивный параметр.

В проблеме надежности условно можно выделить два направления: расчет надежности и ее обеспечение. Если первое направление основывается в основном на применении специальных математических методов, то второе связано с решением традиционных конструкторских и технологических задач по созданию высококачественных изделий и правильной их эксплуатации.

В начальный период развития теории и практики надежности возникли тенденции противопоставления этих двух направлений, что объективно было вызвано, в частности, особенностями подготовки специалистов, занимающихся надежностью. Одна научная школа надежности признавала только количественные (расчетные) методы, другая - только качественные (если соблюдены все технологические процессы, то отказов не будет и, следовательно, расчеты надежности бесполезны).

Специалисты по прикладным методам теории вероятностей и математической статистики, разрабатывающие аппарат теории надежности, недостаточно ясно представляли себе специфику технических задач и порой переоценивали роль количественных методов в обеспечении высокого качества изделий.

Конструкторы и технологи, глубоко понимающие пути и возможности создания высококачественной техники, но недостаточно владеющие математическими методами теории надежности, считали бесполезными расчеты количественных показателей выпускаемой ими продукции.

В процессе становления науки и практики в области надежности сложных технических систем стало понятно, что отдельно взятыми расчетными, конструкторскими или одними организационными методами проблему надежности не решить.

Постепенно ситуация изменилась в пользу разумного сочетания методов расчета надежности и организационно-технического обеспечения надеж-

ности ракетно-космической техники с помощью нормирования, конструкторских решений и экспериментальной отработки, включая летные испытания.

1.2. Надежность ракетной техники

Впервые количественная оценка надежности баллистических ракет, по данным работы [60], была проведена немецкими специалистами в конце Великой Отечественной войны. В декабре 1944 г. Каммлер выпустил обзор надежности ракет А-4 (V-2). В войсковые части за рассмотренный им период было доставлено 625 ракет. Из них 87, или 12,3%, были сразу возвращены заводу («Миттельверк») из-за дефектов в системе управления. Из оставшихся 538 ракет были пущены 495. Из этого числа 44 пуска зарегистрированы как неудачные. При этом на отказы системы управления приходилось 41%, двигательной установки - 13%, на пожары в хвостовой части - 13%, взорвались на старте 2,9% ракет. Таким образом, из 625 ракет явно непригодными к пуску были 131. То есть надежность составила 79%. Однако по уточнениям работы [60] немцы не располагали данными об авариях и разрушении ракет на нисходящем атмосферном участке. По последующему опыту пусков ракет А-4 в Капустином Яре в 1947 году аварии на этом последнем участке траектории у немцев должны были составлять не менее 15-20%. Следовательно, надо уточнить данные немцев и считать, что до цели дошло не более 400 ракет. То есть надежность ракет была не более 64%.

При производстве и пусках Р-1 в Советском Союзе проблемы надежности решались интуитивно. Но, начиная с ракеты Р-2, проблеме надежности стали уделять особое внимание. Ниже приведены некоторые сокращенные выдержки из монографии Б.Е.Чертока [60], который был одним из заместителей С.П.Королева.

Прежде чем перейти к пускам ракет Р-2 первой опытной серии, проверяли надежность новых идей на экспериментальных ракетах Р-2Э. Их было изготовлено шесть и пущено в 1949 году пять. Из всех пяти пусков успешными можно было считать только два. В течение 1950—1951 годов пустили 30 ракет Р-2, из которых уже 24 были удачными. При пусках в 1952 году серийных ракет Р2 из 14 ракет две не достигли цели. Ракета Р-2 была принята на вооружение несмотря на то, что по объективной оценке ее надежность не превышала 86%.

При создании ракеты Р-5 при летных испытаниях, проводившихся в 1953 году, было пущено в два этапа 15 ракет. Из них только две не достигли цели — надежность, наконец-то, начала медленно подтягиваться к уровню 90%.

Такая надежность была недостаточна для установки на ракете атомной бомбы. Создатели ракетно-ядерного оружия задумывались, что будет, если при подготовке ракета с атомной бомбой свалится у старта по причине недостаточной надежности? Поэтому оснащение атомной бомбой ракет Р-5 было отложено примерно на полтора года и разработаны специальные мероприятия по повышению надежности будущих ракет Р-5М - носителей ядерного оружия.

Во-первых, чтобы исключить «непредумышленное разгильдяйство», решили частично использовать опыт обеспечения надежности «атомщиков». Для ракеты Р-5М пересмотрели все инструкции по подготовке на технической и стартовой позициях и тоже, как у «атомщиков», ввели тройной контроль: основной исполнитель — воинская часть (офицер или солдат), контролируют офицер (специалист соответствующего управления полигона) и обязательно - представитель промышленности.

Были внедрены конструкторские мероприятия по повышению надежности ракет Р-5М:

- дублирование в системе управления;
- двигатель на многочисленных огневых стендовых пусках проходил испытания на крайних режимах, существенно превосходящих штатный;
- все бортовые приборы и агрегаты предварительно трясли, "жарили и парили", отсеивая все, внушавшее сомнения в процессе лабораторных и заводских испытаний.

Испытания ракеты Р-5М, предназначенной для установки на ней атомного оружия, начались с января 1955 года. Они предусматривали два этапа: летно-конструкторские и зачетные.

На этап летно-конструкторских испытаний (первый этап) было представлено 17 ракет Р-5М. На этом этапе отработывалась надежность носителя со всеми его бортовыми и наземными системами, проверялась документация, обеспечивающая надежную эксплуатацию. Из 17 ракет 15 достигли цели. Две ракеты отклонились более чем на семь разрешенных градусов, и двигатель был выключен системой автоматического подрыва ракеты.

К зачетным испытаниям (второй этап) были представлены пять ракет Р-5М. Пуски начались в январе 1956 года. Четыре пуска прошли нормально. Последний пятый пуск ракеты Р-5М состоялся 2 февраля с атомным зарядом. Пролетев 1200 км, головка без разрушения дошла до Земли в районе Аральских Каракумов, и был осуществлен ядерный взрыв.

Еще больше проблем, связанных с обеспечением надежности, пришлось решать при создании двухступенчатой ракеты Р-7, которая предназначалась первоначально для доставки ядерной боеголовки на большие расстояния. Надежность двухступенчатой ракеты, состоящей из пяти ракетных блоков, по самым оптимистическим (предварительным) расчетам должна быть существенно ниже надежности одной ракеты. Даже если довести надежность каждого блока до 0,9 (90%), то по теории вероятностей надежность всего пакета будет равна $0,9 \cdot 0,9 \cdot 0,9 \cdot 0,9 \cdot 0,9 = 0,59$, или 59%! Но этот результат надо еще, по крайней мере, два раза умножить на 0,9, учитывая надежность межблоковых механических, электрических и кинематических связей в самом пакете и надежность стартовой системы, представлявшей собой сложнейший механический комплекс с сотнями электрических и гидравлических коммуникаций. Получалась абсурдная величина - 0,478, или 47,8%.

Чтобы обеспечить необходимую надежность, от каждого главного конструктора каждой системы требовали жестко выдержать принцип: один любой отказ в любом месте любого прибора не должен приводить к отказу системы.

Впервые кроме простого дублирования в наиболее критичных местах были использованы методы "голосования" (*мажоритарное резервирование*). Интеграторов продольных ускорений, например, устанавливалось три. Команда на выключение двигателя от интегратора подавалась только после получения двух подтверждений. Допускался отказ одного из трех приборов. Принцип "два из трех" существенно повышал надежность, но усложнял подготовку и испытания. Необходимо было убедиться, что отправляется в полет ракета, у которой все три голосующих прибора или системы в порядке.

Уже тогда создатели ракетной техники поняли необходимость самой тщательной, многоступенчатой и всеобъемлющей наземной отработки.

Кроме наземной отработки предусмотрели и экспериментальные ракетные пуски. Например, на экспериментальной ракете М-5РД (на базе ракеты Р-5) проверялись принципы и аппаратура регулирования двигателей для ракеты

Р-7 и новые приборы инерциальной навигации. Ракета М-5РД была оснащена новым автоматом стабилизации, в который вводилась коррекция положения центра масс ракеты от датчиков поперечного ускорения. Для оптимизации траектории и увеличения точности по дальности испытывалась система регулирования кажущейся скорости. На этой же ракете были проверены принципы системы регулирования опорожнения баков, успокоения уровней жидкости в баках топлива и кислорода и принципы системы измерения амплитуд колебаний жидкости. Всего было изготовлено и пущено пять ракет М-5РД.

Значительно позднее появились десятки руководств, сотни нормативных документов и всякого рода стандартов, регламентирующих процесс создания всех средств ракетной техники от изначальных технических предложений до процедуры сдачи на вооружение.

За недоработки в обеспечении надежности ракет-носителей приходилось платить очень дорогой ценой – человеческими жертвами. Например, в 1960 году на Байконуре при проверках на стартовой позиции стратегической ракеты 8К64 конструкции М. К. Янгеля произошло самопроизвольное включение рулевого двигателя второй ступени ракеты, что привело к возгоранию ракеты с многочисленными человеческими жертвами, среди которых был маршал М. И. Неделин.

Несмотря на бесценный опыт прошлых лет, отказы ракет-носителей продолжают иметь место. На рис. 1.1. показано распределение отказов на одной серии ракет-носителей за период с 1990 по 2001 гг.

По оси ординат отложены относительные значения количества отказов. Видно, что отказы, связанные с производством ракет, превышают отказы, связанные с несовершенством конструкции и ошибками при эксплуатации. Следует заметить, что большая часть отказов выявляется и устраняется до запуска ракет. К авариям приводят, как правило, не выявленные до полета причины отказов.

Значение надежности, оцениваемой статистическими методами, по многим пускам находится в пределах 90—95%. Исключение составляет ракета-носитель серии «Союз», которая создана на базе баллистической ракеты Р-7. Ее точечная (средняя) надежность на сегодняшний момент составляет 99 %.

В качестве аварийных пусков ракет последнего времени можно привести примеры пусков летом 2006 г. ракеты-носителя GSLV (Индия) и ракеты-носителя «Днепр» (на базе конверсионной стратегической ракеты). В начале

2007 года был аварийный пуск ракеты-носителя «Зенит -3L» (международной компании «Морской старт»).



Рис. 1.1. Распределение отказов серии ракет-носителей по различным причинам

1.3. Надежность космической техники

Углубленные исследования в области надежности сложных технических систем относятся к началу 60-х годов и связаны с развитием космических исследований. В частности, в США теория надежности сложных систем стала существенно развиваться после ряда катастроф с космическими объектами. В этой связи НАСА (Национальное управление по аэронавтике и исследованию космического пространства) вынуждено было израсходовать миллионы долларов на проверку, замену и повторное проектирование таких элементов, как фильтры, пневматические выключатели, механические клапаны и исполнительные механизмы.

В 1965 г. НАСА приступило к выполнению ряда крупных научно-

исследовательских работ, целью которых являлось:

- 1) подтверждение надежности путем испытаний на нагрузки;
- 2) исследование надежности систем и элементов, подвергаемых случайным динамическим нагрузкам;
- 3) проектирование механических элементов с учетом заданных показателей надежности в случае зависящих от времени распределений параметров напряжения и прочности.

Аналогичные проблемы возникали при создании космических аппаратов в Советском Союзе. Особенно актуальными стали вопросы обеспечения надежности при осуществлении пилотируемых космических полетов. Этим вопросам уделялось много внимания, тем не менее не удалось избежать многих аварий и катастроф. Приведем один из примеров, характеризующий уровень надежности космической техники времен первых космических полетов.

По рассказам космонавта А.А. Леонова осуществление пилотируемого полета с выходом в открытый космос в 1965 году на космическом корабле «Восход-2» сопровождалось следующими отказами:

- отказ системы автоматической ориентации (после того, как космонавт при выходе в открытый космос оттолкнулся от корпуса шлюзовой камеры);
- отказ системы терморегулирования скафандра (температура тела космонавта поднялась до 40 градусов);
- раздутие скафандра (вследствие чего при возвращении в корабль Леонов не мог протиснуться в шлюзовую камеру ногами вперед, как это было предусмотрено в штатном режиме, и пришлось ему с применением больших физических усилий протиснуться в шлюзовую камеру головой вперед, затем развернуться внутри этой камеры, благо она была выполнена из эластичного прорезиненного материала);
- отказ системы герметизации люка после возвращения космонавта в корабль (утечку воздуха автоматика идентифицировала как недостаток кислорода и была включена система подпитки кислородом атмосферы корабля, поэтому было достаточно небольшой искры от контактов работающих приборов, чтобы возник пожар на борту);
- отказ системы отделения шлюзовой камеры (она потом сгорела в плотных слоях атмосферы);
- отказ системы включения тормозного двигателя в автоматическом режиме (был осуществлен переход на ручное управление);

- отказ системы отделения спускаемого аппарата от приборного отсека (он также отделился в плотных слоях атмосферы вследствие воздействия высоких температур и скоростного напора).

Спуск с орбиты был отложен на сутки для того, чтобы в центре управления полетом нашли выход из положения. За эти сутки космонавты съели весь аварийный запас пищи. Приземлились в горах Сибири, в лесу, ночевали в палатке. Была зима, морозная нелетная погода и поисковая служба смогла к ним пробиться лишь через сутки.

К сожалению, некоторые полеты окончились катастрофой. Можно лишь напомнить, что в 1967 году при испытаниях космического корабля «Союз-1» погиб космонавт В. М. Комаров. Причина катастрофы, как потом было установлено, заключалась в том, что вследствие перепада давления внутри спускаемого аппарата и снаружи (на высоте ввода в действие парашютной системы) основной парашют был зажат стенками парашютного контейнера и не вышел из него. В 1971 после 24-суточного полета на станции «Салют» при возвращении на космическом аппарате «Союз-11» из спускаемого аппарата вышел воздух и погибли космонавты: Г.Т. Добровольский, В.Н. Волков, В.И. Пацаев.

Несмотря на опыт прошлых лет, надежность космических аппаратов оставляет желать лучшего. Так, в США катастрофическими последствиями закончились полеты астронавтов на кораблях типа «Спейсшаттл» («Челленджер» - 1986 г., «Колумбия» - 2003 г.).

На рис. 1.2 приведено распределение отказов одной серии космических аппаратов за период 1991-2000 гг.

По оси ординат отложены относительные значения количества отказов. Видно, что характер распределения отказов такой же, как и у ракет-носителей (см. рис. 1.1).

1.4. Краткий обзор современной литературы по надежности

Поскольку методы теории надежности и методы обеспечения 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 десятичном справочнике "Надежность и эффективность в технике" [36]. 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. Анцелиовича и [10, 14, 31, 37] и др. Причем, в них рассматриваются отдельные вопросы проблемы надежности летательных аппаратов.

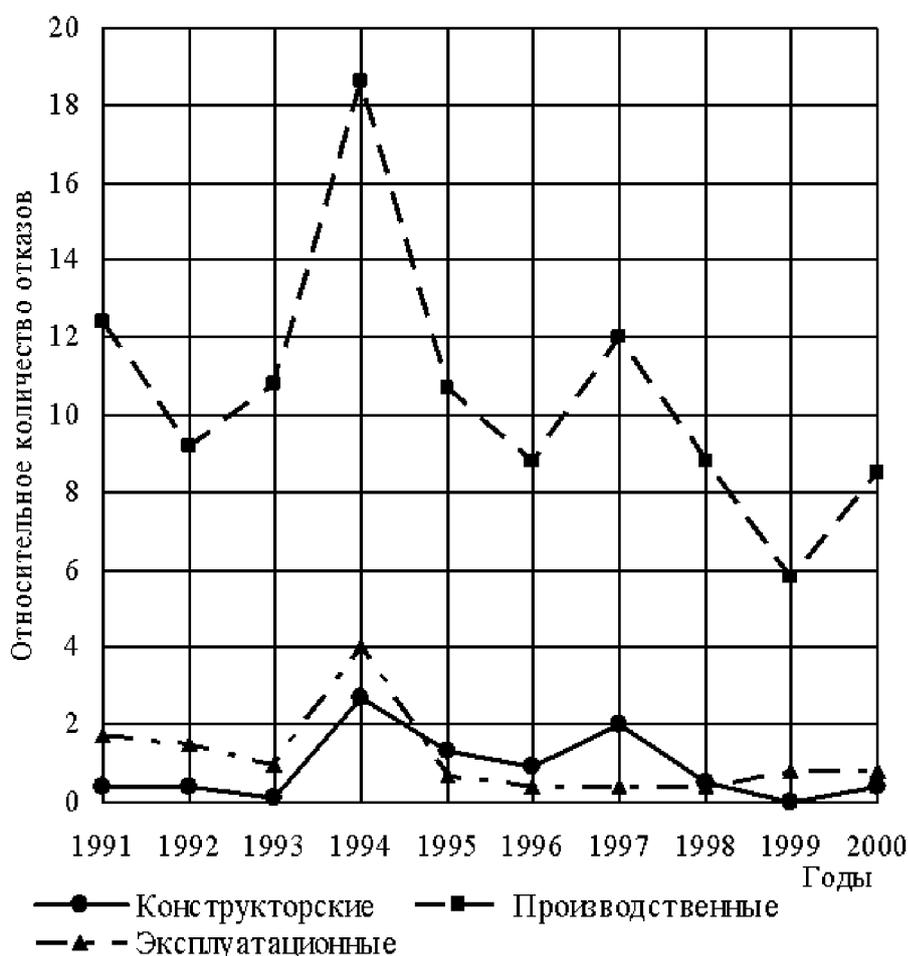


Рис. 1.2. Распределение отказов космических аппаратов по различным причинам

В учебнике А. А. Кузнецова [14] рассматриваются в основном вопросы надежности механических частей летательных аппаратов. В книгах Л. И.

Волкова и А. М. Шишкевича [10, 37] основное внимание уделяется вопросам отработки изделий на стадии производства и эксплуатации. Работа Л. Л. Анцелиовича [31] посвящена вопросам надежности и живучести самолета.

Методические и организационно-технические вопросы надежности космических аппаратов, а также методы расчета надежности космических аппаратов рассматриваются в работах авторов настоящего учебного пособия [54, 55].

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 [41, 52, 53] и др.

Отдельные вопросы надежности механических систем и надежности структурно сложных систем наиболее доступно в методическом плане представлены в монографиях [21, 22, 24, 29].

При расчетной оценке надежности изделий используют методы теории вероятностей и математической статистики. Эти методы изложены в работах [4, 14] и др.

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 [50] и в учебном пособии [62], вопросам живучести самолета посвящены учебник [31] и монография [42], вопросы изучения механизма разрушения соударяющихся тел с большой скоростью изложены в многочисленных публикациях на эту тему.

Кроме учебной, справочной и монографической литературы существует нормативная литература по надежности, которая, как правило, имеется в проектных организациях в достаточном количестве, а также выпущены государственные стандарты.

Основным документом, в котором изложен состав системы стандартов по надежности, является ГОСТ 27.001-95 «Система стандартов «Надежность в технике». Основные положения». Согласно этому документу Государственные стандарты по надежности классифицируются по группам,

каждой из которых присвоен определенный код. Такая спецификация в укрупн

Таблица 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, приведенной на рис. 1.3.



Рис. 1.3. Схема обозначений стандартов по надежности

Примеры обозначения и наименования стандартов из разных групп:

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 27.203-83. Надежность в технике. Технологические системы. Общие требования к методам оценки надежности.

ГОСТ 27.301-95. Надежность в технике. Расчет надежности. Основные положения.

ГОСТ 27.451-80. Надежность в технике. Испытания на ремонтпригодность. Основные положения.

ГОСТ 27.505-86. Надежность в технике. Система сбора, обработки и информации о надежности бытовой радиоэлектронной аппаратуры и комплектующих ее изделий.

Стандартов по надежности довольно много. Достаточно привести пример со стандартом ГОСТ 27.451-80. Порядковый номер этого стандарта в четвертой группе - 51.

Кроме того, существуют стандарты по надежности, которые не подчиняются требованиям по обозначению, представленным в ГОСТ 27.001-95. Это объясняется тем, что некоторые стандарты выпущены ранее и они периодически продлеваются.

Следует отметить, что существуют стандарты по отдельным аспектам надежности с другим обозначением. Например, ГОСТ 24.701-83. Надежность. Автоматизированные системы управления технологическими процессами. Основные положения.

1.5. Объем изучаемых вопросов

В рамках учебных дисциплин изучить все вопросы надежности, возникающие в процессе разработки и эксплуатации ракетно-космической техники, невозможно. Поэтому в настоящем учебном пособии рассматривается ограниченный круг вопросов, позволяющих изучить методы расчета надежности и получить представление об организационно-технических вопросах надежности ракетно-космических систем.

На рис. 1.4. представлена схема, отражающая приближенное соотношение объема вопросов, изучаемых в рамках дисциплин, связанных с надежностью ракетно-космических комплексов, и вопросов, решаемых в практической деятельности создателей и эксплуатирующих организаций ракетно-космической техники.

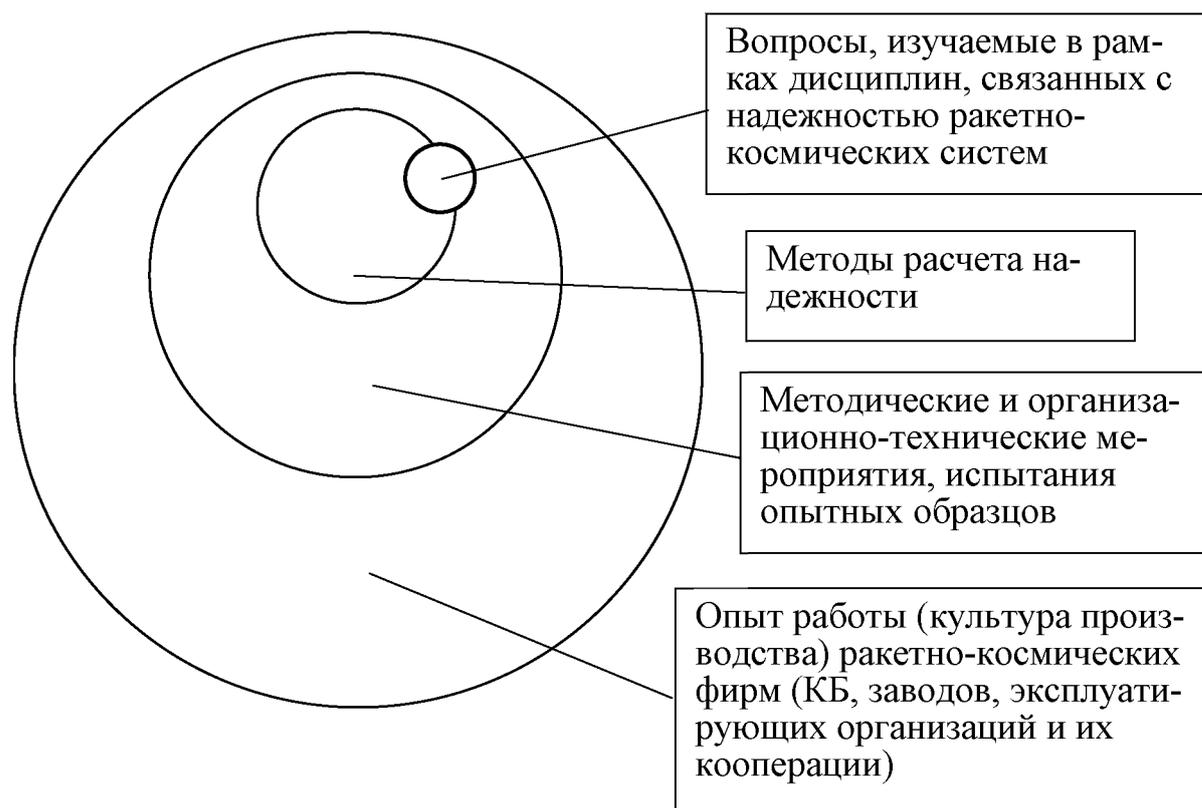


Рис. 1.4. Соотношение объема изучаемых вопросов надежности и вопросов, решаемых в практической деятельности

1.6 Контрольные вопросы

1. Расскажите об истории появления и развитии методов количественной оценки надежности технических систем.
2. Расскажите о надёжности ракетной техники.
3. Кто и в какое время впервые обратился к анализу надёжности ракетной техники?
4. Расскажите о надёжности космической технике.
5. Осветите вопрос о современной литературе по надёжности.
6. Как обозначаются стандарты по надёжности?

2. НАДЕЖНОСТЬ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Чтобы нагляднее понять разницу между свойствами эффективности и свойствами надежности сложных технических систем, приведем вкратце пример, заимствованный из научно-фантастического рассказа «Принцип надежности», который был опубликован в 80-е годы прошлого века в журнале «Техника молодежи».

Ученые (будущего) решили поставить эксперимент: как будут развиваться роботы, если им предоставить полную свободу? Создали закрытую зону роботов, где они делали то, что «желали». Оказалось, что роботы сумели самоорганизоваться и стали создавать себе подобных роботов с более совершенными свойствами.

Но, начиная с некоторого времени, все поменялось. Самые совершенные роботы оказались в подвалах, прикованными к рабочим местам, где создавали себе подобных роботов. Руководить же ими стали менее «умные» роботы. А во главе всей пирамиды управления стал робот, который только и умел, что работать гаечным ключом. Если подчиненные ему заместители, роботы посложнее, не выполняли его указаний, то он поджимал гайки на голове у этих роботов, если же они были послушны - ослаблял.

Ученые, которые следили за экспериментом, начали искать причину сбоя в поведении «общества» роботов. В конце-концов оказалось, что один из сотрудников лаборатории, в которой и проводили эксперимент на роботах, решил «показать себя», без одобрения других ученых, инкогнито, проник в зону роботов, изменил принцип управления по-своему, чтобы, как ему казалось, эксперимент был успешнее.

Настоящие же ученые пришли к выводу, что их коллега из-за недостаточной компетентности поставил свойства надежности выше свойств эффективности.

Для того, чтобы лучше понять вопрос о соотношении эффективности и надежности сложных технических систем, рассмотрим сначала структуру ракетно-космического комплекса.

2.1. Структура ракетно-космического комплекса

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.

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

На рис. 2.1 представлена структурная схема ракетно-космического комплекса.

Подсистемами ракетно-космического комплекса являются технический комплекс, ракетно-космическая система (ракета-космического назначения), стартовый комплекс и др.

В состав ракетно-космической системы входят [22] ракеты-носители, включающие в свой состав ракетные блоки и полезную нагрузку - космическую головную часть (или космический аппарат).

В зависимости от задач ракетно-космической системы и схемы полета ракета-носитель может сообщать космическому аппарату скорость, необходимую для осуществления:

- суборбитального полета (полета по орбите с высотой апогея 180...200 км и высотой перигея 0-30 км, который осуществляется для снижения и затопления ракетных блоков на первом же витке полета);
- вывода на низкие «опорные» орбиты (как правило околокруговые с высотой 180...200 км);
- вывода на переходные эллиптические орбиты (переходные к рабочим орбитам);

- вывода на рабочие орбиты (как правило, низкие).

Некоторые маневры, связанные с довыводом космических аппаратов на рабочие орбиты, могут осуществляться с помощью корректирующей двигательной установки самого космического аппарата.

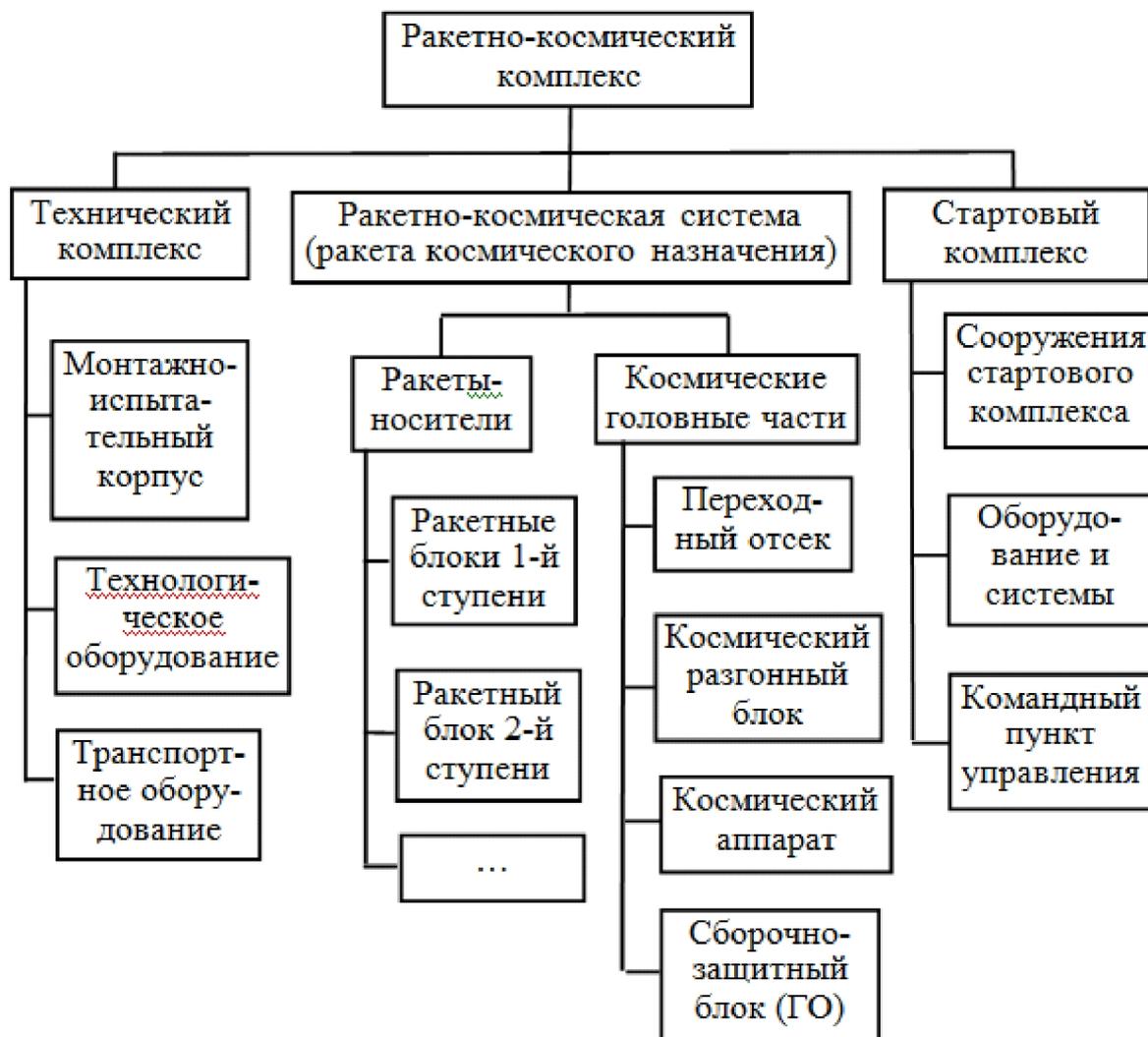


Рис. 2.1. Структурная схема ракетно-космического комплекса

Если в составе ракеты космического назначения или в составе космической головной части имеются космические разгонные блоки (блоки, способные длительное время находиться в космическом пространстве и обеспечивать запуск двигателей в невесомости), то ракета-носитель, как правило, сообщает космическому аппарату скорость, необходимую для осуществления суборбитального полета или полета по опорной орбите. Дальнейшее маневрирование осуществляется с помощью космических разгонных блоков. Довывод космических аппаратов на рабочие орбиты или корректировка орбит

могут быть осуществлены также с помощью корректирующей двигательной установки космического аппарата.

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).

Надсистемой ракетно-космического комплекса является космический комплекс, включающий в свой состав орбитальный комплекс (КА, находящиеся на орбитах) и наземный комплекс управления (рис. 2.2).

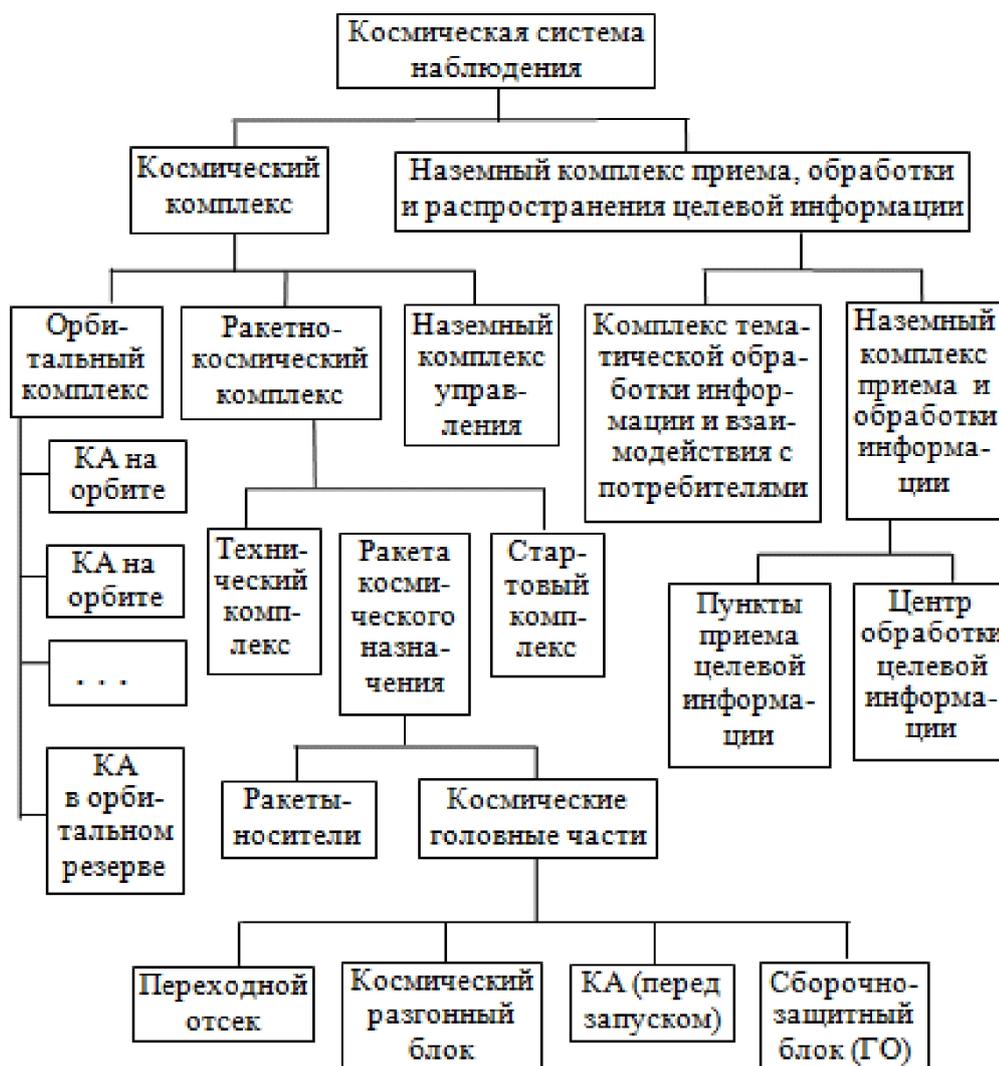


Рис. 2.2. Структура космической системы наблюдения

Надсистемой космического комплекса является космическая система, в которую также входит наземный комплекс приема, обработки и распространения целевой информации.

В свою очередь, ракетные блоки и космический аппарат можно рассматривать как системы, состоящие из элементов.

В качестве примера на рис. 2.3 представлена структурная схема космического аппарата.

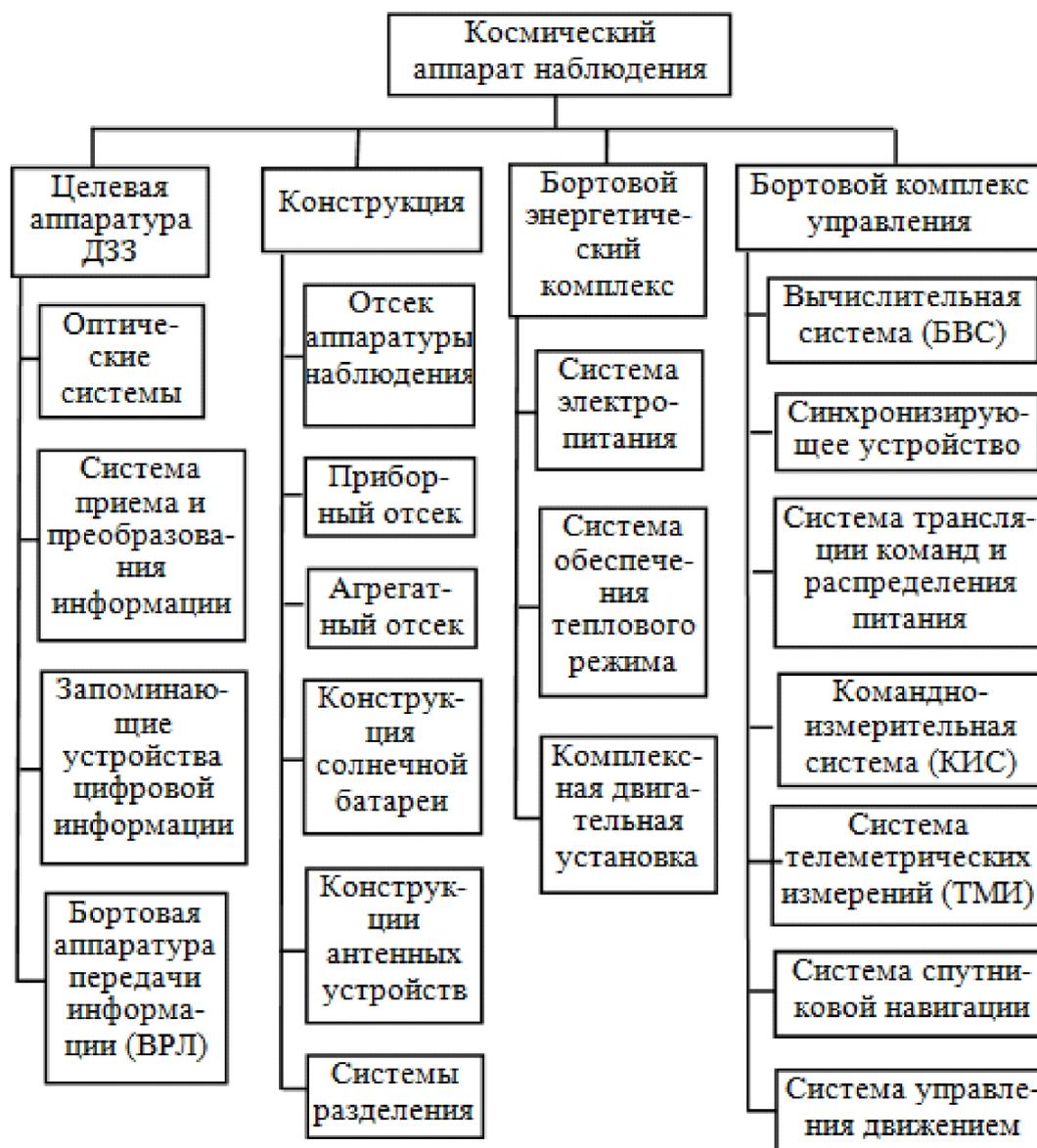


Рис. 2.3. Структура космического аппарата наблюдения

Подсистемами КА являются целевая аппаратура дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), конструкция, бортовой энергетический комплекс и бортовой комплекс управления.

Представленные подсистемы космического аппарата тоже можно рассматривать в качестве надсистем над бортовыми системами, агрегатами, устройством и конструкцией космического аппарата (см. рис. 2.3).

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

2.2. Эффективность системы

Результат функционирования космической системы наблюдения характеризуется следующими показателями:

- способностью наблюдать заданный район (обзорностью);
- спектральными характеристиками аппаратуры наблюдения;
- пространственной разрешающей способностью;
- периодичностью;
- производительностью;
- оперативностью доставки видеоинформации на Землю;
- точностью привязки целей;
- сроком активного существования и т.д.

В процессе эксплуатации системы тактико-технические показатели могут быть реализованы не в полной мере. Результаты целевого функционирования сложной технической системы зависят еще от внешних (по отношению к системе) *условий применения* сложной технической системы и от *способов использования активных средств управления* этой системой.

Таким образом, *эффективность* сложной технической системы – это свойство получать результат (эффект) ее функционирования с учетом *условий применения* сложной технической системы и с учетом *способов использования активных средств управления* этой системой.

Применительно к космической системе наблюдения внешними условиями являются:

- высота Солнца над горизонтом (для аппаратуры зондирования в видимом спектре);
- яркость объекта наблюдения и контрастность изображения;
- облачность (для аппаратуры зондирования в видимом спектре);
- помехи, возникающие при передаче изображения или командных сигналов по радиолинии;
- противодействие конкурентов или противника и др.

К активным средствам управления относятся технические средства

(орудия, машины, аппаратура управления, технические комплексы, большие технические системы), а также ресурсы (вещественные, энергетические, информационные, временные, денежные и т. п.).

Способы использования активных средств управления системой обычно соотносят с понятием *операции*.

Операция (от лат. *operatio* — действие) — действие или ряд действий, направленных на достижение какой-либо цели (например, военная операция, операция по управлению сложной технической системой). Под операцией понимают любую согласованную совокупность действий, объединенных общим замыслом и единой целью.

Исследование операций — область науки и практической деятельности, имеющая своим предметом изучение операций (целенаправленных процессов). Задачей этого изучения является получение выводов и рекомендаций, способствующих принятию правильных решений по организации и управлению операцией.

За полученный результат система расплачивается ресурсами. Очевидно, чем ближе результат обмена к предельно выгодному, тем эффективнее операция. Предельно выгодный обмен характеризует потенциальную эффективность операции.

Способ использования активных средств в операции называют *стратегией*.

Результат операции ставят в зависимость от основных результирующих факторов: полезного эффекта, затраченных ресурсов, времени.

В свою очередь, результирующие факторы зависят от выбранной стратегии. Следовательно, результат операции также будет зависеть от стратегии.

Исследование операции проводится всегда с точки зрения интересов одного распорядителя (основного субъекта системы), которого называют лицом, принимающим решение (ЛПР).

Набор всевозможных взаимоисключающих (альтернативных) способов использования активных средств составляет множество допустимых стратегий. Выбор конкретной стратегии из множества допустимых стратегий является основным этапом принятия решения.

Процесс подготовки и принятия решений ЛПР, организация их выполнения и контроль составляют сущность управления операцией.

Применительно к космической системе наблюдения операции могут быть направлены на:

- достижение целей функционирования в штатных условиях эксплуатации;
- парирование внешних неблагоприятных условий;
- парирование внутренних неблагоприятных условий.

Элементами операций, направленных на достижение целей функционирования в штатных условиях эксплуатации, могут быть:

- планирование порядка съемки объектов наблюдения;
- астроориентация;
- проверка готовности КА к проведению съемки;
- разворот корпуса КА для съемки цели;
- фокусировка оптической системы (наведение на резкость);
- включение фотоприемного устройства;
- запись сигнала в запоминающее устройство;
- поворот антенн на спутник-ретранслятор;
- передача информации;
- разворот корпуса КА для съемки следующей цели и т. д.

Элементами операций, направленных на достижение цели космической системы по парированию неблагоприятных внешних условий, могут быть:

- изменение порядка съемки целей, расположенных в полосе обзора космического аппарата;
- изменение орбиты для срочного выхода на «важную» цель;
- использование аппаратуры с различными характеристиками по детальности, размеру ширины полосы обзора в зависимости от поставленных частных задач;
- использование средств защиты космического аппарата от преднамеренного воздействия вероятным противником и др.

Элементами операций, направленных на достижение цели космической системы наблюдения по парированию неблагоприятных внутренних условий, могут быть:

- действия, направленные на переключение отказавших элементов бортовых систем на резервные элементы;
- действия, направленные на пополнение запасов электричества, и др.

Показатели эффективности – количественные характеристики свойств эффективности сложной технической системы.

Показатели эффективности сложной технической системы могут измеряться в тех же величинах, что и тактико-технические показатели или быть безразмерными.

В этом смысле в задачах исследования операций, где происходит поиск лучшей стратегии, тактико-технические показатели сложной технической системы можно рассматривать как максимально возможные значения показателей эффективности в реальных условиях эксплуатации, то есть как потенциально достижимые показатели эффективности сложной технической системы в идеальных условиях применения и идеальной стратегии применения активных средств операции.

Безразмерные показатели эффективности, как правило, выражают степень соответствия реального результата операции требуемому или потенциально возможному результату для заданных стратегий и условий.

Степень соответствия реального результата операции требуемому результату называют ***эффективностью операции***.

Примеры безразмерного показателя эффективности космической системы наблюдения [54]:

- вероятность обеспечения в течение времени активного существования космического аппарата суточного относительного выходного эффекта космической системы не ниже заданного;

- 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 в течение того же периода времени не возникнут.

На рис. 2.4 представлена схема, иллюстрирующая влияние условий применения и способов использования активных средств в операции на эффективность космической системы наблюдения (КСН).

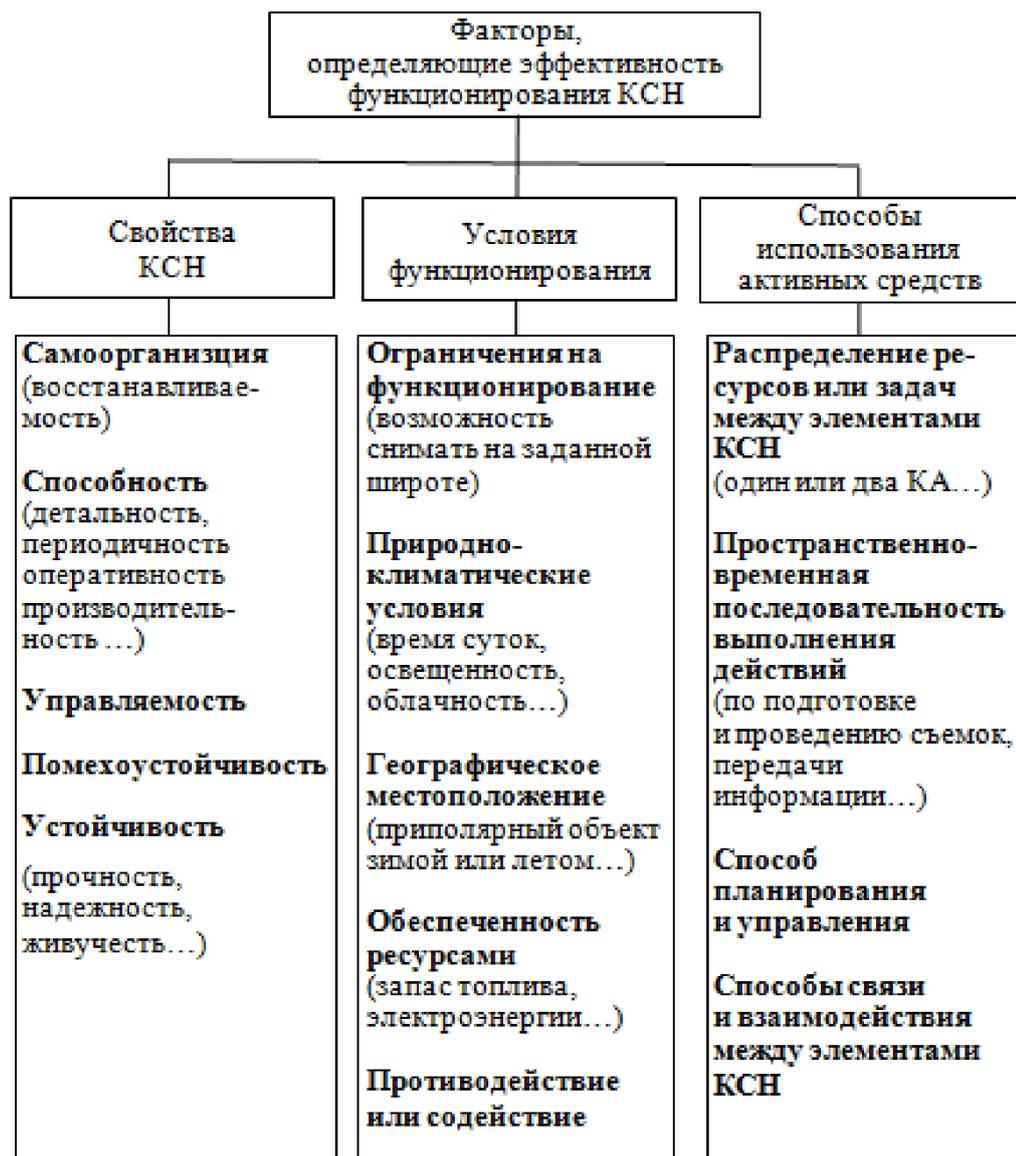


Рис. 2.4. Составляющие эффективности космической системы наблюдения

Существует иной подход к определению эффективности [38]. Согласно этому подходу требования, предъявляемые к космическим системам (или аппаратам) наблюдения условно можно разделить на две группы:

- требования (ограничения), определяющие *пригодность* системы к выполнению своего целевого назначения;
- требования, определяющие выполнение системой или аппаратом заданных функций с *максимальным эффектом* с ограничениями по затратам массы и других ресурсов (финансовых, трудовых, временных и т.п.) на достижение этого эффекта.

Требования первой группы, как правило, должны задаваться в форме ограничений, а требования второй группы – в форме экстремума (минимума или максимума) показателя, характеризующего эти требования.

Требования первой группы, как правило, относят к категории *качества*, а требования второй группы - к категории *эффективности* космической системы или космического аппарата наблюдения.

То есть разделение показателей космической системы наблюдения, характеризующих ее работу по целевому назначению, на показатели *качества* и *эффективности* является условным и зависит от решаемой проектной задачи.

В качестве показателей эффективности мы можем выбрать любой из показателей качества, если будем стремиться улучшать эти показатели. Например, часто ставится задача спроектировать систему с повышенной производительностью. Тогда вместо показателя качества "производительность" следует рассматривать показатель эффективности с тем же названием – "производительность".

2.3. Надежность системы

Как ясно из предыдущих рассуждений, надежность является одной из характеристик системы, комплекса или летательного аппарата, а именно характеристик устойчивости системы (см. рис. 2.4).

Можно рассматривать и несколько другой аспект в различии между требованиями к эффективности и надежности системы, а именно с позиций совершенствования систем и выбора критериев проектирования. Это различие состоит в том, что критерии эффективности служат для выбора оптимальных решений, связанных с обоснованием основных технических характеристик (параметров) сложных изделий и способов их использования, а критерии надежности – для выбора оптимальных технических решений, связанных с необходимостью сохранения основных технических характеристик изделий и их элементов в течение требуемого промежутка времени.

Приведем определения надежности, которые изложены в стандарте «ГОСТ 27.002-89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения».

Надежность – свойство объекта (системы) 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.

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 – это свойство объекта, заключающееся в приспособленности к предупреждению и обнаружению отказов, повреждений и к восстановлению работоспособности 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.

2.4. Изменение надежности ракетно-космического комплекса в процессе жизненного цикла

Космические комплексы (как сложные технические системы) имеют определенный так называемый жизненный цикл, особенности которого необходимо учитывать в процессе создания и эксплуатации КК.

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, ракеты-носителя (или комплекса) включает в себя несколько стадий, которые укрупненно представлены ниже:

- исследование и обоснование разработки;
- разработка;
- наземная экспериментальная отработка;
- летные испытания;
- серийное производство;
- эксплуатация;
- снятие с эксплуатации (утилизация).

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 комплекса (КА, ракеты-носителя) выполняют эскизный проект (ЭП) и составляют технические задания на составные части космического комплекса, в том числе и ТЗ на разработку конструктивно-компоновочной схемы космического аппарата и ракеты (если она создается вновь или модернизируется).

После выпуска эскизного проекта ведется разработка рабочей документации и наземная экспериментальная отработка, которые включают в себя:

- выпуск рабочих чертежей всех создаваемых изделий;
- проведение комплекса расчетов по всем направлениям;
- проектный анализ возможных последствий и критичности отказов;
- лабораторно-отрабочные испытания;
- конструкторско-доводочные испытания;
- комплексные испытания по подтверждению основных характеристик изделия в целом.

После завершения расчетных работ и наземной экспериментальной отработки выпускается итоговый отчет о готовности к началу летных испытаний.

Летные испытания могут делиться на летно-конструкторские и зачетные.

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 ракетно-космических комплексов ведется в эксплуатирующих организациях и включает в себя основные технологические процессы:

- приведение комплекса (ракеты-носителя, КА) в готовность к применению;
- поддержание в этой готовности;
- применение комплекса по назначению.

На стадии эксплуатации возможны отдельные доработки по замечаниям, выявленным в процессе эксплуатации, а также модернизация элементов комплекса, ракеты, космического аппарата (сокращенно ЛА).

Надежность любого изделия в основном определяется этапом проектирования. На остальных этапах она уточняется и подтверждается. Только при наличии грубых ошибок в проектировании количественные значения надежности могут существенно меняться. С учетом этого можно считать, что надежность ракет и космических аппаратов на каждой стадии сначала не достигает требуемого значения с достаточным уровнем доверия. На рис. 2.5 схематично показано изменение надежности ЛА в процессе его создания. По оси абсцисс отложено время "жизни" ЛА, а по оси ординат - условный относительный показатель надежности изделия P по отношению к требуемому $P_{тр}$.

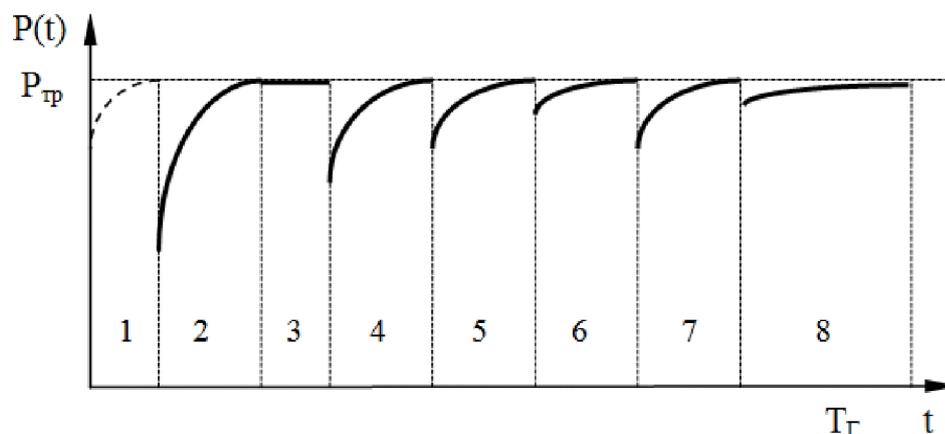


Рис. 2.5. Изменение подтвержденных характеристик надежности РКТ в процессе его создания

Данная схема относится к летательным аппаратам, которые предназначены для серийного изготовления и относительно частой смены при эксплуатации, например, к ракетам-носителям и космическим аппаратам небольшого срока активного существования (которые периодически заменяют в процессе эксплуатации).

На рисунке введены следующие обозначения различных этапов жизненного цикла летательных аппаратов и их комплексов: 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.

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 доработок и устранения причин отказов надежность агрегатов и бортовых систем, а следовательно и ЛА в целом повышается.

Переход к летным испытаниям опытных образцов также может сопровождаться снижением функции надежности, так как не все условия полета удастся имитировать на Земле. Аналогичный скачок надежности имеет место и при начале испытаний образцов установочной партии, так как при переводе технологии с опытного производства на технологию серийного производства неизбежны ошибки.

В процессе эксплуатации ЛА его надежность растет за счет устранения конструктивных ошибок и стабилизации производственных (технологических) процессов.

Тем не менее, ошибки при проектировании неизбежны и задача состоит в том, чтобы как можно больше ошибок устранить на ранних стадиях создания ЛА. При пропуске ошибок на этапах проектирования, отработки, серийного производства и эксплуатации приходится дорабатывать проект или технику. Чем позже выявлены ошибки, тем большие финансовые средства необходимы на доработки. В литературе по надежности приводится примерное соотношение затрат на исправление ошибок (1:10:100:1000). Это соотношение следует понимать следующим образом.

На исправление проектной ошибки, если она выявлена сразу, требуется столько же средств, сколько потрачено на ее «совершение». Если проектная ошибка обнаружена на этапе отработки, то на ее устранение требуется средств на порядок больше, так как это связано с производством опытных образцов. Если проектная ошибка обнаружена на этапе серийного производства, то на ее устранение требуется средств на два порядка больше, так как это связано с корректировкой технологического процесса и заменой некоторых составных частей изделия. Если проектная ошибка обнаружена на этапе эксплуатации, то на ее устранение требуется средств на три порядка больше, чем на ее «совершение», так как это связано еще и с заменой эксплуатируемых образцов техники (например, с заменой множества ракет, находящихся на складе, или заменой запущенного на орбиту космического аппарата).

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

На рис. 2.6 схематично показано изменение надежности космических аппаратов, срок активного существования которых исчисляется несколькими годами (уникальных КА). Такие космические аппараты характеризуются тем, что никаких отдельных этапов летных, зачетных испытаний и испытаний установочной партии серийного производства не производится. Летные испытания, зачетные испытания и эксплуатация производятся на одном образце, который проходит все указанные этапы.

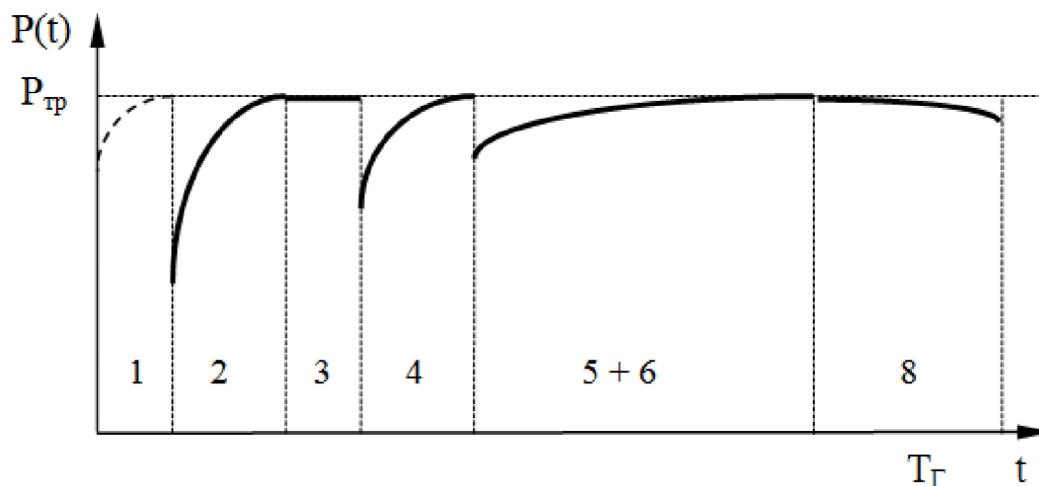


Рис. 2.6. Изменение подтвержденных характеристик надежности уникальных КА в процессе его создания

При испытаниях отказы конечно происходят, но, благодаря заранее принятым мерам (например, трехкратному резервированию приборов), отказы, как правило, не являются критичными.

Отказы устраняются наземными службами с помощью корректировки программного обеспечения бортового комплекса управления. При создании уникальных КА особое внимание уделяется вопросам проектирования и наземной отработки.

Отличительной особенностью создания надежных летательных аппаратов является учет изменения состояния ЛА во времени при его эксплуатации. С этой целью все время "жизни" готового изделия разделяется на этапы эксплуатации или периоды функционирования. Эти этапы или периоды могут быть более или менее крупными и степень подробности зависит от типа ЛА и поставленных задач по анализу надежности.

Приведем укрупненные этапы эксплуатации космических аппаратов:

- 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 видео-информации;
- наблюдение и прием информации;
- обработка видеоинформации;
- передача видеоинформации на Землю;
- коррекция орбиты КА;
- профилактическое обслуживание и ремонт (для обслуживаемых КА) и т.п.

На каждом этапе и периоде функционирования летательные аппараты должны характеризоваться своими показателями надежности (показатель

надежности - это количественная характеристика свойств надежности; более подробно показатели надежности рассмотрены в последующих разделах). Можно привести аналогию со здоровьем человека. Например, нормальная температура тела человека еще не означает, что он здоров. Существует множество показателей, характеризующих здоровье человека, в частности показателей качества крови и др.

Так же обстоит дело и в ракетно-космической технике. Нельзя характеризовать надежность сложных технических систем одним показателем. Показатели надежности ракетно-космических систем должны учитывать: сложность состава; целевое функционирование во времени; различные этапы эксплуатации; отдельные периоды функционирования и др. Причем, чем больше показателей надежности используется при проектировании и эксплуатации летательных аппаратов, тем объективнее картина с точки зрения надежности.

2.5 Контрольные вопросы

1. Расскажите о структуре ракетно-космического комплекса.
2. Расскажите о структуре космической системы
3. Что такое эффективность системы.
4. Дайте определение надёжности системы.
5. Поясните отличие категорий надёжности и эффективности применительно к ракетно-космической технике.
6. Как изменяется надёжность ракетно-космического комплекса в процессе жизненного цикла?

3. ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ

Начнем с некоторых основных терминов и определений надежности, которые можно применить к любым сложным техническим системам. Более полно термины и определения представлены в стандарте «ГОСТ 27.002-89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения». Затем рассмотрим специфические термины и определения, которые применимы к ракетно-космическим системам.

3.1. Основные технические состояния

Исправное состояние – состояние объекта (или системы), 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 объектива космического аппарата 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 космического аппарата 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.

3.2. 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.

Например, признаками отказов и предельных состояний космического аппарата являются:

- прекращение (полное и частичное) выполнения объектом заданных функций. Например, не поступает видеoinформация с космического аппарата;

- отклонение заданных показателей качества за пределы установленных норм. Например, видеоинформация 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, выработано топливо двигательной установки и т.п.

Критичность отказа – совокупность признаков, характеризующих последствия отказа.

Различают *критичные* и *некритичные* отказы. Последние подразделяются на существенные и несущественные (рис. 3.1).



Рис. 3.1. Классификация отказов

Критичный отказ – отказ системы или ее элемента, тяжесть последствий которого в пределах данного анализа признана недопустимой и требует принятия специальных мер по снижению вероятности данного отказа и/или возможного ущерба, связанного с его возникновением.

Например, отказ телескопа космического аппарата наблюдения будет критичным, если этот телескоп один, а отказ канала передачи видеоинформации – некритичным, если этих каналов два. Последний отказ может быть существенным, если значительно уменьшается оперативность системы, или не существенным, 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.

3.3. Временные понятия

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

Ресурс – суммарная наработка объекта от начала его эксплуатации или ее возобновления после ремонта определенного вида 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 продолжительность 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.

3.4. 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. 3.2.

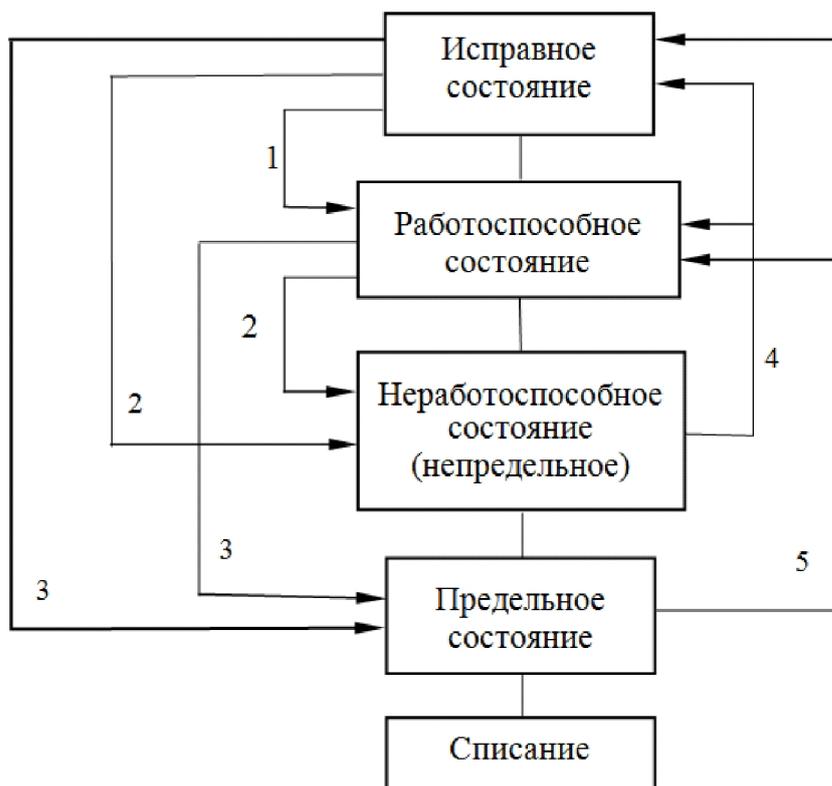


Рис. 3.2. Схема основных состояний и событий

На этом рисунке введены следующие обозначения позиций: 1 - повреждение; 2 - отказ; 3 - переход объекта в предельное состояние; 4 - восстановление; 5 - ремонт.

3.5. Общетехнические 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 отказа объекта не возникнет.

Гамма - процентная наработка до отказа – наработка, в течение которой отказ объекта не возникает с вероятностью γ , выраженной в процентах. Поясним это с помощью рис. 3.3, где точками на оси отложено время отказа десяти испытывавшихся приборов. 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 t .

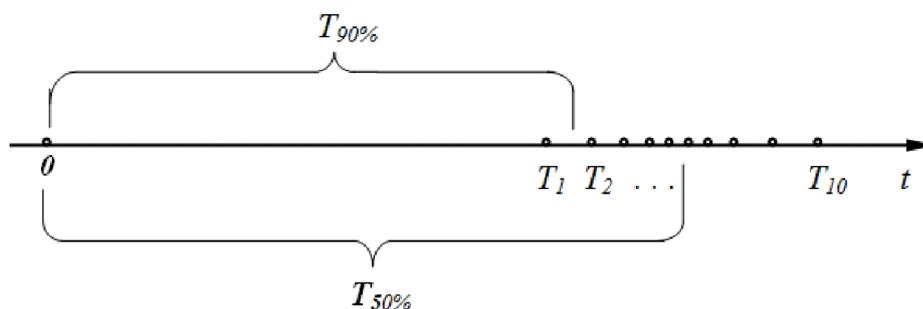


Рис. 3.3. Пояснения к вопросу о гамма-процентной наработке до отказа

Средняя наработка до отказа – математическое ожидание наработки объекта до первого отказа. Она соответствует 50- процентной наработке до отказа (см. рис. 3.3) для нормального закона распределения.

Интенсивность отказов. Этот показатель надежности рассматривается далее в подразделе "Надежность как качество, развернутое во времени" раздела "Методы расчета показателей надежности элементов".

Далее приведем названия показателей надежности без их определения, так как 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.

3.6. Термины и определения надежности космических комплексов и ракетно-космических систем

Применительно к космическим комплексам используют как общетехнические термины и определения, которые рассматривались выше, так и специфические термины и определения надежности, которые не противоречат определениям, приведенным выше, а лишь конкретизируют их и, в этой связи, являются более простыми. Приведем эти термины, принятые в нормативной документации ракетно-космической отрасли. Эти термины могут быть применены не только к космическому комплексу, но и к его подсистемам, а именно, к ракетно-космическому комплексу, ракете-носителю, космическому аппарату.

Надежность космического комплекса (КК) – вероятность безотказной работы КК в течение заданного промежутка времени¹.

¹ Строго говоря, это определение надежности несколько противоречит определению надежности общетехнических систем, так как надежность это, прежде всего,

Отказ КК – событие, состоящее в том, что не достигается заданный выходной эффект. Например, если космический аппарат принял и переработал видеоинформацию, но не смог ее передать на Землю.

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

Интегральный выходной эффект – характеризует общий результат решения системой (объектом) поставленных задач в течение всего времени функционирования. Например, количество квадратных километров поверхности Земли, 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, занятых 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.

свойство. Вероятность же безотказной работы - это лишь один из количественных показателей надежности.

3.7. Показатели надежности космических комплексов и ракетно-космических систем

Применительно к космическим комплексам (системам, ракетам-носителям, космическим аппаратам) используют как общетехнические показатели надежности, так и специфические показатели. Комплексные показатели надежности космических комплексов и систем подразделяют на обобщенные, основные и дополнительные.

Обобщенный показатель надежности - показатель, характеризующий надежность комплекса (системы, объекта) в целом на всех периодах функционирования при заданных способах и условиях его применения.

Основной показатель надежности - характеризует надежность комплекса (системы, объекта) на отдельном периоде его функционирования.

Дополнительные показатели надежности используют для решения частных задач обеспечения и контроля надежности комплекса (системы) объекта.

Структура показателей надежности космического комплекса приведена на рис. 3.4.

Рассмотрим подробно специфические показатели надежности космического комплекса, которые применимы также к ракетно-космическим системам и летательным аппаратам.

Вероятность обеспечения в течение времени активного существования суточного относительного выходного эффекта не ниже заданного уровня² имеет вид:

$$P_{КА}(E_{сут} \geq E_{сут}^{Tp}, T_{AC}) = \frac{S}{S_0}, \quad (3.1)$$

где $P(\cdot)$ – символ вероятности;

$E_{сут}$ – суточный выходной эффект;

² Строго говоря, этот показатель является показателем эффективности, а не показателем надежности, однако он используется в нормативной документации ракетно-космической отрасли как показатель надежности.

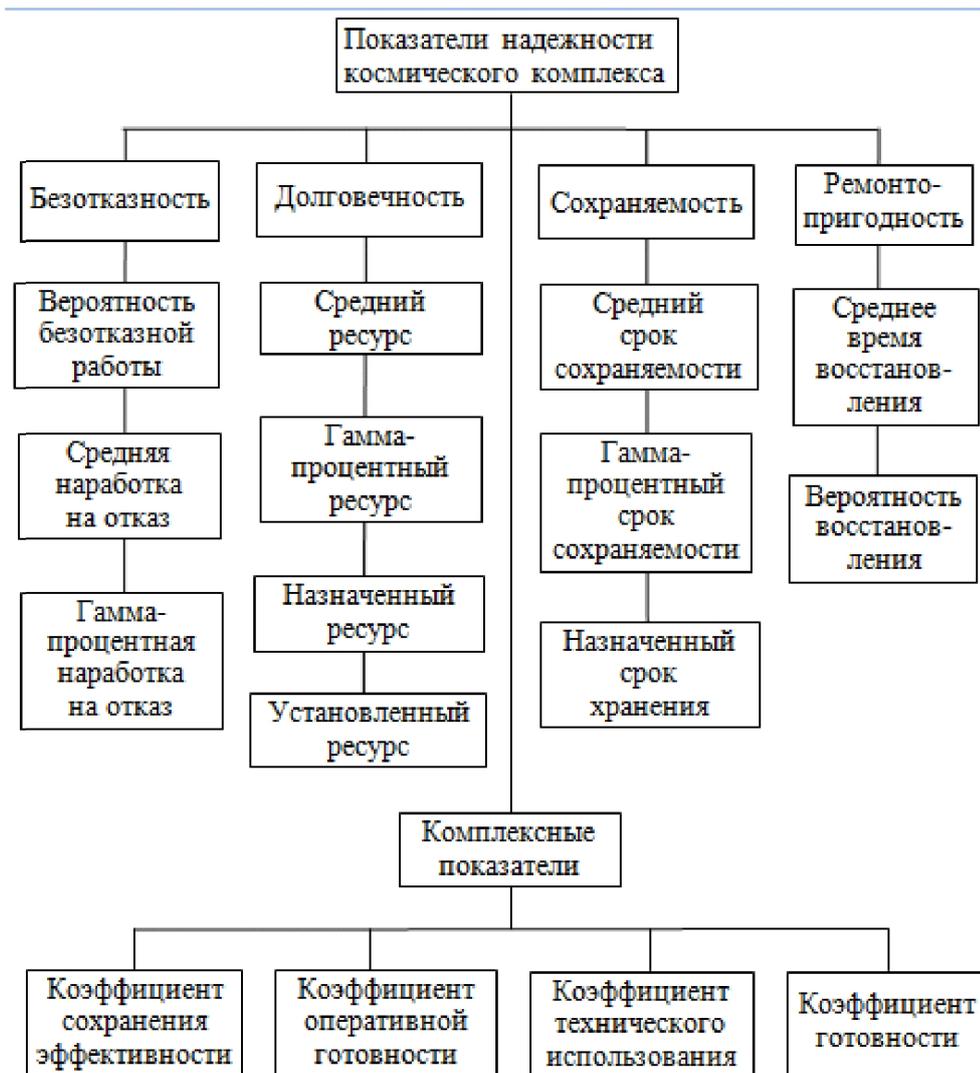


Рис. 3.4. Структура показателей космического комплекса

$E_{сут}^{Tr}$ – требуемый суточный выходной эффект;

T_{AC} – время активного существования;

S – число суток, в которых КА работал нормально;

S_0 – число суток в течение времени активного существования.

Например, надежность космического аппарата может быть задана следующим показателем:

$$P_{КА}(E_{сут} \geq 80\% \text{ от } E_{сут}^{ном}, T_{AC} = 3 \text{ года}) = 0,835,$$

что читается следующим образом: вероятность получения объектом суточного выходного эффекта более 80% от номинального ($E_{сут}^{ном}$) за 3 года активного существования равна 0,835.

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.

Статистическая оценка коэффициента готовности (стационарное значение) определяется по следующей формуле:

$$K_2^{KC} = \frac{T_0 - \sum t_{npi}^n}{T_0},$$

где T_0 – время функционирования КА за исключением плановых простоев;

$\sum t_{npi}^n$ – сумма времени простоя (неплановое).

Например, $K_2^{KC} = 0,93$ 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.

Статистическая оценка коэффициента технического использования (стационарное значение) выражается следующим образом:

$$K_{mu} = \frac{\sum t_{pi}}{\sum t_{pi} + \sum t_{npi}^{na} + \sum t_{npi}^n},$$

где $\sum t_{pi}$ – суммарное время работы;

$\sum t_{npi}^{na}$ – суммарное время простоев (плановое).

Например, $K_{mu} = 0,87$ за время эксплуатации $T_{\text{э}} = 2$ года.

Основное отличие коэффициентов готовности и технического 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.

Статистическая оценка этого коэффициента (стационарное значение) определяется следующим образом:

$$K_{сэ} = \frac{E_{\delta}}{E_{ном}}, \text{ за время } T_{э},$$

где E_{δ} - показатель действительной эффективности;

$E_{ном}$ - показатель номинальной эффективности;

$T_{э}$ - время эксплуатации.

Например, $K_{сэ} = 0,87$ (или 85% от номинального) за время $T_{э} = 3$ года.

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.

В качестве показателей надежности можно использовать показатели безотказности, долговечности, ремонтпригодности, сохраняемости и комплексные показатели (коэффициент готовности, коэффициент сохранения эффективности), если их применять к частным задачам, выполняемым космической системой (космическим комплексом, ракетно-космической системой, летательным аппаратом), и к отдельным устройствам и системам летательных аппаратов. Например, можно использовать следующие показатели: среднее время развертывания космической системы, ресурс двигательной установки и т.п.

Для каждого типа космического аппарата могут быть выбраны или назначены свои показатели надежности. Пример выбранных основных показателей надежности для типового космического аппарата наблюдения показан в таблице 3.1.

Таблица 3.1 - Показатели надежности КА и КС

Периоды функционирования	Основные показатели надежности
1. Хранение	Средний срок сохраняемости
2. Дежурство	Вероятность нахождения КА в состоянии готовности (коэффициент готовности)
3. Подготовка к выведению на орбиту	Среднее время подготовки к пуску Гамма-процентное время подготовки к пуску за время, не превышающее нормативное Вероятность подготовки к пуску за заданное время и т.п.
4. Выведение на орбиту	Вероятность безотказной работы функционирующих систем в течение времени выведения
5. Функционирование на орбите:	Вероятность простоя Вероятность выполнения задачи орбитального полета
5.1. Нахождение в орбитальном резерве	Вероятность сохранения работоспособного состояния в течение заданного времени
5.2. Нахождение в готовности к приему и обработке информации	Вероятность нахождения в состоянии готовности
5.3. Целевая работа:	Вероятность обеспечения заданного уровня дифференциального выходного эффекта
5.3.1. Наблюдение	Вероятность нахождения цели
5.3.2. Обслуживание заявок	Коэффициент оперативной готовности
5.3.3. Прием и передача видеоинформации на Землю	Вероятность передачи информации за время, не более заданного Вероятность сохранения качества информации
5.3.4. Профилактическое обслуживание и ремонт на орбите	Среднее время восстановления Гамма-процентное время восстановления за время, не превышающее нормативное

3.8 Контрольные вопросы

1. Приведите основные технические состояния сложных технических систем.
2. Приведите примеры дефектов, повреждений, отказов применительно к изделиям и системам ракетно-космической техники.
4. Приведите термины надёжности, связанные с изменением показателей надёжности во времени.
5. Расскажите об общетехнических терминах надёжности.

6. Приведите показатели надёжности ракетно-космических систем.
7. Расскажите о показателях надёжности космических аппаратов и космических систем применительно к различным периодам функционирования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в конспекте лекций изложены вопросы истории становления надёжности ракетно-космических комплексов, основные положения теории надёжности, категории надёжности и эффективности, вопросы терминологии, основные определения надёжности сложных технических систем и систем и изделий РКТ.

В то же время много вопросов из-за ограниченности объема пособия осталось вне поля нашего зрения. Желающих более глубоко изучить вопросы, связанные с надёжностью изделий, можно отослать к литературе, приведенной в списке использованных источников.

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

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Шор, Я. Б. Статистические методы анализа и контроля качества надежности / Я. Б. Шор. - М.: Советское радио, 1962.
2. Шишонок, Н. А. Основы теории надежности и эксплуатации радиоэлектронной техники / Н. А. Шишонок, В. Ф. Репкин, Л. Л. Барвинский; под ред. И. А. Шишонка. - М.: Советское радио, 1964. - 552 с.
3. Нечипоренко, В. И. Структурный анализ и методы построения надежных систем / В. И. Нечипоренко. - М.: Советское радио, 1968. - 256 с.
4. Вентцель, Е. С. Теория вероятностей / Е. С. Вентцель. - М., Наука, 1969.
5. Конструкция управляемых баллистических ракет. / под ред. А. М. Синюкова и Н. И. Морозова. - М.: Военное издательство. 1969. - 444с.
6. Броди, С. М., Расчет и планирование испытаний систем на надежность / С. М. Броди, О. Н. Власенко, Б. Г. Марченко.- Киев: Наукова думка, 1970. - 192 с.
7. Черкесов, Г. Н. Надежность технических систем с временной избыточностью / Г. Н. Черкесов; под ред. А. М. Половко. - М.: Советское радио, 1974. - 295 с.
8. Волков, Е. Б. Основы теории надежности ракетных двигателей / Е. Б. Волков, Р. С. Судаков, Т. А. Сырицин. - М.: Машиностроение, 1974. - 400 с.
9. Вероятностные характеристики прочности авиационных материалов и размеров сортамента: справочник. / А. А. Кузнецов, О. А. Алифанов, В. И. Веторов [и др.], А. А. Золотов, М. И. Титов; под ред. проф. С. О. Охупкина. - М.: Машиностроение, 1970. - 568 с.
10. Волков, Л.И. Надежность летательных аппаратов / Л.И. Волков, А.М. Шишкевич. - М.: Высшая школа, 1975, - 294 с.
11. Козлов, Б. А. Справочник по расчету надежности аппаратуры радиоэлектроники и автоматики / Б. А. Козлов, И. А. Ушаков. - М.: Советское радио, 1975. - 472 с.

12. Надежность и эффективность АСУ / Ю. Г. Заренин, М. Д. Збырко, Б. П. Креденцер [и др.]; под общ. ред. Ю. Г. Заренина. - Киев: Изд-во «Техніка», 1975. - 368 с.
13. Ремонтпригодность машин / А. И. Аристов, П. Н. Волков, Л. Г. Дубицкий [и др.]; под ред. проф. П. Н. Волкова. - М.: Машиностроение, 1975. - 368 с.
14. Кузнецов, А.А. Надежность конструкций баллистических ракет / А.А. Кузнецов. -М.: Машиностроение, 1978. -256 с.
15. Кристофидес, Н. Теория графов. Алгоритмический подход / Н. Кристофидес. – М.: Мир, 1978. – 476 с.
16. Райкин, А. Л. Элементы теории надежности технических систем / А. Л. Райкин; под ред. проф. И. А. Ушакова. - М.: Советское радио, 1978. - 280 с.
17. Зажигаев, Л. С. Методы планирования и обработки результатов физического эксперимента / Л. С. Зажигаев, А. А. Кишьян, О. И. Романиков. - М.: Атомиздат, 1978. - 232 с.
18. Фрэнк, Г. Сети, связи, потоки / Г. Фрэнк, И. Фриш; пер. с англ. под ред. Д. А. Поспелова. - М.: Связь, 1978. - 448 с.
19. Райншке, К. Модели надежности и чувствительности систем / К. Райншке; пер. с нем. проф. Б. А. Козлова. - М.: Мир, 1979. - 454 с.
20. Оре, О. Теория графов / О. Оре. - М.: Наука, 1980. - 336 с.
21. Капур, К. Надежность и проектирование систем/ К. Капур, Л. Ламберсон; пер. с англ. М.: Мир, 1980. -604с.
22. Рябинин, И.А. Логико-вероятностные методы исследования надежности структурно-сложных систем / И.А. Рябинин, Г.И. Черкесов. - М.: Радио и связь, 1981.
23. Ракеты-носители / под ред. проф. С.О. Осипова. - М. Военное изд-во министерства обороны СССР, 1981. - 315 с.
24. Болотин, В. В. Методы теории вероятностей и теории надежности в расчетах сооружений / В. В. Болотин. - М.: Стройиздат, 1982. - 351 с.
25. Кузнецов, А.А. Математическое обеспечение надежности летательных аппаратов / А. А. Кузнецов. - М. МАИ, 1982. -72с.
26. Болшев, Л.И. Таблицы математической статистики /Л. И. Болшев, Н. В. Смирнов. - М.: Наука, 1983.

27. Вопросы математической теории надежности / Е. Ю. Бразирович, К. Ю. Беляев, В. А. Каштанов [и др.]; под ред. Б. В. Гнеденко. - М.: Советское радио, 1983. - 376 с.
28. Диллон, Б. Инженерные методы обеспечения надежности систем / Б. Диллон, Ч. Сингх; пер. с англ. - М.: Мир, 1984. - 318 с.
29. Болотин, В.В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций / В. В. Болотин. - М.: Машиностроение, 1984. - 312 с.
30. Статистические методы обработки результатов наблюдений / Р. М. Юсупов, Г. Б. Петухов, В. Н. Сидоров [и др.]; под ред. проф. Р. М. Юсупова. - М.: Министерство обороны СССР, 1984. - 563 с.
31. Анцелиович, Л. Л. Надежность, безопасность и живучесть самолета / Л.Л. Анцелиович. - М.: Машиностроение, 1985.
32. Надежность технических систем: справочник / под ред. проф. И. А. Ушакова. - М.: Радио и связь, 1985. - 607 с.
33. Лукашев, Л. Г. Надежность систем конструкций летательных аппаратов / Л.Г. Лукашев, В. И. Куренков; Куйбышев. авиац. ин-т. - Куйбышев, 1986.
34. Тарасов, Ю.Л. Элементы прочностной надежности авиационных конструкций / Ю. Л. Тарасов, Э. И. Миноранский; - Куйбышев. авиац. ин-т. Куйбышев, 1986.
35. Степанов, С. Л. Космическая среда и условия пребывания в ней летательных аппаратов / С. Л. Степанов, В. Т. Тимшин, Л. П. Юмашев; - Куйбышев, Куйбышев. авиац. ин-т. 1986.
36. Надежность и эффективность в технике: справочник в 10 т. - М.: Машиностроение, 1986 - 1990.
37. Волков, Л. И. Управление эксплуатацией летательных комплексов / Л. И. Волков. - М.: Высшая школа, 1987.
38. Основы синтеза систем летательных аппаратов / А. А. Лебедев, В. Н. Баранов, В. Т. Бобронилов [и др.] - М.: Машиностроение, 1987, -224 с.
39. Байхельт, Ф. Надежность и техническое обслуживание. Математический подход / Ф. Байхельт, П. Франкен; пер. с нем. М. Г. Коновалова под ред. И. А. Ушакова. - М.: Радио и связь, 1988. - 392 с.
40. Надежность и эффективность в технике: справочник. В 10 т. / ред. совет: В. С. Авдудевский (предс.) и др. - М.: Машиностроение, 1988. Т. 3. Эф-

фективность технических систем / под общ. ред. В. Ф. Уткина, Ю. В. Крючкова. – 328 с.

41. Золотов, А.А. Обеспечение надежности транспортных аппаратов космических систем / А. А. Золотов, М.И. Титов. - М.: Машиностроение, 1988.

42. Боевая живучесть летательных аппаратов / С. И. Базазянц, А. Н. Меднов, А. Ф. Букшин [и др.]; под ред. В. Ф. Леонтьева - М.: Военное издательство, 1988.

43. Федоров, В. Избыточность функционирующих структур - фундаментальный фактор надежности физиологических систем / В. Федоров. // Успехи современной биологии. Том 105, вып. 2, 1988.

44. Райншке, К. Оценка надежности систем с использованием графов / К. Райншке, И. А. Ушаков. - М.: Радио и связь, 1988, - 209 с.

45. Коваленко, И. Н. Методы расчета высоконадежных систем / И. Н. Коваленко, Н. Ю. Кузнецов. - М.: Радио и связь, 1988, - 176 с.

46. Решетов, Д. Н. Надежность машин / Д. Н. Решетов, А. С. Иванов, В. З. Фадеев; подред. проф. Д. Н. Решетова. - М.: Высшая школа, 1988. - 240 с.

47. Косточкин, В. В. Надежность авиационных двигателей и силовых установок / В. В. Косточкин. Изд-е 2-е. - М.: Машиностроение, 1988. -272 с.

48. Северцев, Н.А. Надежность сложных систем в эксплуатации и отработке / Н.А Северцев. - М.: Высшая школа, 1989. - 432 с.

49. Согомоян, Е. С. Самопроверяемые устройства и отказоустойчивые системы / Е. С. Согомоян, Е. В. Слабаков. - М.: Радио и связь, 1989. - 208 с.

50. Справочник по безопасности космических полетов / Г. Т. Береговой, В. И. Ярополов, И. И. Баранецкий [и др.] - М.: Машиностроение, 1989. - 336 с.

51. Надежность ракетной техники. Астронавтика и ракетодинамика: Экспресс-информация. - М.: ВИНТИ, 1990, №15. Вып. 2. С 22-24.

52. Лебедев, А.А. Проектирование космических аппаратов наблюдения / А.А. Лебедев, О.П. Нестеренко. - М.: Машиностроение, 1991.

53. Ханцеверов, Ф.Р. Моделирование космических систем моделирования природных ресурсов Земли / Ф. Р. Ханцеверов, В.В. Остроухов. - М.: Машиностроение, 1989.

54. Методические и организационно-технические вопросы надежности космических аппаратов: конспект лекций / В. И. Куренков, В. И. Кузнецов, В. А. Капитонов [и др.]. - Самара: Самар. гос. аэрокосм. ун-т, 1997. - 42 с.

55. Куренков, В. И. Методы расчета надежности космических аппаратов: конспект лекций / В. И. Куренков. - Самара: СГАУ, 1998. – 80 с.
65. Управление космическими аппаратами зондирования Земли. Компьютерные технологии / Д. И. Козлов, Г. П. Аншаков, Я. А. Мостовой [и др.]. - М.: Машиностроение, 1998. - 368 с.
57. Куренков, В. И. Основы безопасности космических полетов: Конспект лекций / В. И. Куренков.. - Самара: СГАУ, 1999. - 68 с.
58. Надежность сложных технических систем / В. В. Малышев, К. А. Карп, В. И. Кочетков [и др.]. - М.: Изд-во МАИ, 1999. -64 с.
59. Спутниковые системы мониторинга. Анализ, синтез и управление / В. В. Малышев, М. Н. Красильщиков, В. Т. Бобронников [и др.]; под ред. проф. В. В. Малышева. - М.: Изд-во МАИ, 2000. - 566 с.
60. Черток, Б. Е. Ракеты и люди / Б. Е. Черток. 3-е изд. - М.: Машиностроение, 2002. - 416 с.
61. Прочностная и вибрационная отработка космических аппаратов / А. И. Белоусов, С. И. Ткаченко, В. Н. Спмсонов, О. А. [и др.]; под. ред. проф. А. И. Белоусова. - Самара: Изд-во Самарского научного центра РАН, 20.2, - 502 с.
62. Оценка метеорно-техногенной опасности полета космического аппарата: учеб. пособие / В. И. Куренков, Л. Г. Лукашев, Л. П. Юмашев; под ред. чл.-корр. РАН Д. И. Козлова. Самар. гос. аэрокосм. ун-т. - Самара: 2004, - 67 с.
63. Куренков, В.И. Выбор основных проектных характеристик и конструктивного облика ракет-носителей. учеб. пособие. / В.И. Куренков, Л.П. Юмашев; под ред. чл.-корр. РАН Д. И. Козлова. Самар. гос. аэрокосм. ун-т. - Самара: 2005, - 237 с.
64. Куренков, В. И. Основы устройства и моделирования целевого функционирования космических аппаратов наблюдения: учеб. пособие / В. И. Куренков, В. В. Салмин, Б. А. Абрамов. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2006. – 296 с.
65. Справочник по специальным функциям / пер. с англ.; под ред. М. Абрамовица и И. Стиган. - М: Наука, 1979.
66. ГОСТ 27.002-89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения.