



ИЗДАТЕЛЬСТВО

МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

К.В. ЕВДОКИМОВ
В.В. КОЖЕВНИКОВ
С.А. ХАРТОВ

НАДЕЖНОСТЬ
ЭНЕРГОСИЛОВЫХ
УСТАНОВОК
КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Москва • 2018

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ
(национальный исследовательский университет)**

К.В. ЕВДОКИМОВ, В.В. КОЖЕВНИКОВ, С.А. ХАРТОВ

**НАДЁЖНОСТЬ
ЭНЕРГОСИЛОВЫХ УСТАНОВОК
КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ**

Учебное пособие

Утверждено
на заседании редсовета
4 июня 2018 г.

Москва
Издательство МАИ
2018

Евдокимов К.В., Кожевников В.В., Хартов С.А.

Надёжность энергосиловых установок космических аппаратов: Учебное пособие. — М.: Изд-во МАИ, 2018. — 36 с.: ил.

Изложены методологические основы современной теории надежности. Приводятся методики прогнозирования и повышения надежности элементов и систем энергосиловых установок космических аппаратов (ЭСУ КА) в процессе проектирования и изготовления. Учитываются различные способы резервирования отдельных узлов для обеспечения заданного уровня надежности. Для закрепления понимания теоретического материала необходимо воспользоваться примерами и задачами, приведенными в отдельном пособии Л.А. Латышева, В.С. Молостова-Астафьева, К.В. Евдокимова «Методические указания для практических занятий по курсу “Надежность ЭСУ”» [9], которое позволяет приобрести навык решения прикладных задач.

Пособие предназначено для студентов аэрокосмических специальностей вузов.

Рецензенты:

кафедра Э-8 МГТУ им. Н.Э. Баумана (зам. зав. кафедрой д-р техн. наук, профессор *М.К. Марахтанов*);

д-р техн. наук, профессор *В.П. Ходненко*

Тем. план 2018, ч. 2, поз. 7

**Евдокимов Константин Викторович
Кожевников Владимир Владимирович
Хартов Сергей Анатольевич**

**НАДЁЖНОСТЬ ЭНЕРГОСИЛОВЫХ УСТАНОВОК
КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ**

Редактор *Е.Л. Мочина*

Компьютерная верстка *Т.С. Евгеньевой*

Сдано в набор 15.11.2018. Подписано в печать 17.01.2019.

Бумага писчая. Формат 60×84 1/16. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 2,09. Уч.-изд. л. 2,25. Тираж 100 экз.

Заказ 960/629.

Издательство МАИ

(МАИ), Волоколамское ш., д. 4, Москва, А-80, ГСП-3 125993

Типография Издательства МАИ

(МАИ), Волоколамское ш., д. 4, Москва, А-80, ГСП-3 125993

ISBN 978-5-4316-0556-7

© Московский авиационный институт
(национальный исследовательский
университет), 2018

1. МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИССЛЕДОВАНИЯ НАДЕЖНОСТИ СОВРЕМЕННОЙ ТЕХНИКИ

1.1. Общие положения

Под **техникой**, в широком смысле слова, понимают все многообразие машин и механизмов, систем и агрегатов, приборов и устройств, предназначенных для осуществления процессов производства и удовлетворения разнообразных потребностей общества.

Машины, механизмы, агрегаты, приборы, устройства, аппаратура и приспособления можно рассматривать как разновидности **изделий**.

Под **системой** понимается множество совместно действующих элементов, образующих некоторую целостность, предназначенную для выполнения определенных функций. Например, в состав космического аппарата могут входить: система управления, система связи, система энергоснабжения и др.

Под **элементом** понимается часть системы, предназначенная для выполнения определенных ее функций и рассматриваемая при анализе структуры как единое целое.

Под **надежностью** в узком смысле понимают способность изделия исправно работать в течение определенного отрезка времени в заданных условиях эксплуатации.

В нормативно-технической документации [1] **надежность** определяется как свойство *готовности* и влияющие на него свойства *безотказности* и *ремонтпригодности* и обеспеченности технического обслуживания. При этом под **готовностью** понимается способность изделия выполнять требуемую функцию при данных условиях в предположении, что необходимые внешние ресурсы обеспечены.

Надежность изделия — комплексное свойство, характеризующееся четырьмя показателями: *безотказностью*, *долговечностью*, *ремонтпригодностью* и *сохраняемостью*.

Безотказность — способность изделия выполнить требуемую функцию в *заданном интервале времени* при данных условиях.

Долговечность — способность изделия выполнять требуемую функцию *до достижения предельного состояния* при данных условиях.

Ремонтопригодность — способность изделия *к поддержанию или восстановлению состояния*, в котором оно может выполнять требуемые функции при данных условиях использования и технического обслуживания.

Сохраняемость — способность изделия выполнять требуемую функцию *в течение и после хранения и (или) транспортирования*.

Кроме качественных показателей, в “Терминах и определениях” [2] вводятся количественные показатели надежности.

Наработка — интервал времени, в течение которого изделие находится в состоянии *функционирования*. Наработка может выражаться непрерывной величиной (часы, километры, литры) или дискретной величиной (число циклов, срабатываний, запусков).

Срок службы — продолжительность эксплуатации изделия до наступления предельного состояния.

Ресурс — суммарная наработка изделия в течение срока службы.

Гамма-процентный ресурс — ресурс, в течение которого изделие не достигает предельного состояния с *вероятностью γ* , выраженной в процентах.

Важными понятиями, позволяющими определять работоспособность изделия, являются **отказ** и **критерий отказа**.

Отказ — *потеря способности* изделия выполнять требуемую функцию.

Критерий отказа — *заранее оговоренные признаки нарушения работоспособного состояния*, по которым принимают решение о факте наступления отказа.

Причина отказа — *обстоятельства* в ходе разработки, производства или эксплуатации изделия, которые привели к отказу.

Последствия отказа — *значимость* отказа в пределах или вне пределов изделия.

Под методологией исследования надежности в технике понимают совокупность используемых методик и общую схему проведения исследований. Методика исследования сводится к постановке задачи, описанию цели, выбору стратегии и общих принципов исследования.

Исследование надежности является составной частью *проектирования* и имеет поисковый, прогностический характер. Основные задачи исследования на этом этапе [3] заключаются в обосновании требований по надежности к изделию и его составным частям, в выборе стратегии проектного обеспечения надежности.

Исследование надежности начинается с этапа разработки **технического задания (ТЗ)** на изделие. Как правило, требования к надежности изделия задают главному разработчику в **количественной** форме.

С целью обеспечения заданных показателей надежности разрабатывают ряд нормативных документов, среди которых важное место занимает **программа обеспечения надежности (ПОН)**, в которой предусматривают как технические, так и организационные мероприятия, направленные на обеспечение надежности.

Надежность изделия и его составных частей оценивается на каждом этапе разработки. Это существенно сокращает затраты на изготовление изделий, время и средства на его экспериментальную отработку.

Целью **экспериментальной отработки** являются сравнительный анализ работоспособности изделий при различных вариантах конструкции и выбор наилучшего из них. Экспериментальную отработку изделия проводят в условиях, максимально приближенных к реальным условиям эксплуатации.

Опыт показывает, что наиболее эффективна работа по повышению надежности при выполнении следующих требований [4]:

- надежность закладывается на стадии научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, обеспечивается при производстве и поддерживается при техническом обслуживании;
- значения показателей надежности должны быть не ниже норм, регламентированных государственными стандартами;
- расчеты должны проводиться на стадиях разработки технического предложения и рабочего проекта;
- расчеты надежности новых изделий должны предшествовать испытаниям опытных образцов;
- новые и модернизированные изделия должны проходить экспериментальную отработку на надежность.

Использование результатов расчетов надежности изделий и агрегатов в качестве априорной информации при планировании ис-

пытаний и оценке результатов необходимо для сокращения сроков разработки и постановки изделия на производство.

1.2. Задачи обеспечения надежности энергосиловых установок космических аппаратов

Историю проведения исследований в области надежности можно разделить на три этапа [5]:

- 1955—1960 гг.: период статистико-вероятностного описания наработок до отказа;
- 1960—1970 гг.: сбор и обработка информации об эксплуатационной надежности;
- после 1970 г.: развитие математического аппарата теории надежности и придание ей инженерной направленности.

За прошедшее время проблема надежности технических систем и входящих в них элементов значительно усложнилась. Это обусловлено, главным образом, следующими основными причинами:

1) повышением сложности современных технических систем. Современные технические системы включают до $10^4 \dots 10^6$ и более элементов;

2) повышением интенсивности режимов работы установок и их элементов, сложностью условий эксплуатации энергосиловых установок. Современные энергосиловые установки космических аппаратов (ЭСУ КА) эксплуатируются в широких диапазонах температур (от -50 до $+150^\circ\text{C}$), давлений (от глубокого вакуума до сверхвысоких давлений), влажности (от 0 до 100%), при вибрации с большими амплитудами в широком диапазоне частот, при высоких линейных ускорениях (до $10g$), при интенсивной солнечной и космической радиации и т.д. Это приводит к тому, что интенсивность отказов элементов и систем может возрасти в десятки раз по сравнению с интенсивностью отказов в стендовых условиях;

3) повышением требований к качеству и точности работы объектов и повышением ответственности за выполняемые функции. Отказы многих современных ЭСУ КА могут привести к катастрофическим экологическим последствиям, крупным техническим авариям и экономическим потерям. Часто экономический ущерб значительно превышает стоимость вышедшего из строя оборудования.

Повышение сложности технических объектов и технических требований к ним, как следствие, приводит к повышению требований к их надежности.

Основная задача теории надежности как прикладной науки — служить базой для выбора оптимальных технических решений при проектировании, конструировании, изготовлении, транспортировке, хранении, техническом обслуживании и эксплуатации, *которые обеспечивают сохранение основных технических характеристик объектов и их элементов в течение необходимого промежутка времени в определенных условиях эксплуатации.*

Теория надежности:

- устанавливает общие принципы и методы оценки и обеспечения надежности технических устройств;
- изучает количественные характеристики надежности;
- исследует связь между показателями экономичности, эффективности и показателями надежности;
- служит основой для разработки методов проведения испытаний на надежность и методов обработки результатов этих испытаний, методов контроля надежности.

Теория надежности позволяет также выбрать наиболее эффективные методы повышения надежности объектов (резервирование наименее надежных элементов и систем, снижение интенсивности их отказов).

При решении этих задач теория надежности использует результаты исследований физических и химических процессов, приводящих к снижению надежности. В ряде разделов теории надежности широкое применение находят математические методы теории вероятностей, математической статистики, математической логики, статистического моделирования и др.

Проблема обеспечения надежности [4] сопутствует всем этапам жизненного цикла изделия — от зарождения идеи создания до окончания срока активной эксплуатации: **при расчете и проектировании** объекта его **надежность закладывается** в проект, при изготовлении **надежность обеспечивается**, при эксплуатации — **реализуется**.

Поэтому проблема обеспечения надежности — комплексная проблема, и решать ее необходимо на всех этапах жизненного цикла, используя для этого различные методы и средства. Уровень надежности технических систем закладывается в процессе их проектирования благодаря применению надлежащих конструктивных

решений, выбору соответствующих материалов и элементной базы. На этой стадии возможен **расчет ожидаемой надежности** объекта, основанный на статистических данных о надежности элементов или анализе работы аналогичных технических систем с учетом конкретных условий эксплуатации. Достоверность результатов расчета целиком определяется **достоверностью и полнотой** исходной информации. Отклонение режимов технологических процессов от расчетных при производстве изделий снижает надежность продукции. Поэтому достоверное суждение о надежности выпускаемых изделий возможно только на основе экспериментального исследования реальных образцов продукции в условиях, максимально приближенных к эксплуатационным. Решение этой задачи является содержанием **испытаний** технических средств на надежность.

С другой стороны, многообразие технических объектов, а также процессов, которые в них происходят, сложность взаимодействия элементов друг с другом и с окружающей средой, нестабильность свойств материалов, большое количество случайных факторов, оказывающих влияние на уровень надежности, не позволяют разработать единую универсальную методику расчета и прогнозирования надежности технических систем.

Это обусловило необходимость создания и развития максимально формализованной и достаточно **универсальной теории надежности**, призванной на основании статистических экспериментальных исследований технических объектов и их элементов разработать методики расчета и прогнозирования надежности и дать рекомендации для ее повышения при производстве и эксплуатации.

В теории надежности получены фундаментальные результаты [5] в двух направлениях исследований: **вероятностно-статистическом** (для технических систем со сложной многоэлементной структурой и сложными связями между элементами) и **детерминированном**, связанном с исследованием физики отказов (для механических систем, элементов конструкций, конструкционных материалов и других элементов технических систем).

В рамках первого направления разработаны математические методы оценки надежности систем, прогнозирования надежности, планирования испытаний, статистической обработки результатов испытаний и эксплуатации.

В рамках второго направления изучены механизмы износа, усталостной прочности, коррозии, старения и других физико-хи-

мических процессов, оказывающих основное влияние на надежность объектов, разработаны методы расчета на прочность и износ элементов.

Как любая прикладная наука, теория надежности базируется на фундаментальных законах математики и естественных наук.

Математический аппарат теории надежности позволяет разрабатывать универсальные методы расчета характеристик надежности ЭСУ КА практически любой сложности.

Теория надежности базируется на результатах исследования процессов разрушения, износа, старения и изменения свойств материалов, т.е. **физики отказов**.

При решении прикладных задач теория надежности оперирует совокупностью методов и алгоритмов расчета, проектирования и оптимизации конкретных видов техники и элементов (уравнениями и зависимостями, описывающими рабочие процессы).

Разработка универсальных методов и рекомендаций по расчету и повышению надежности различных технических объектов позволяет, в ряде случаев, эффективно использовать методы, разработанные для одних видов техники, применительно к другим, рассматривать общие закономерности и выявлять фундаментальные законы надежности.

Проблема проектирования надежных ЭСУ КА тесно связана с вопросами обеспечения длительных сроков активного существования (САС) космических аппаратов и со снижением затрат [6]. Низкая надежность и малые сроки активного существования являются причинами значительного увеличения финансовых затрат и затрат материальных ресурсов.

Необходимыми условиями повышения эксплуатационной надежности КА являются системный подход и наличие единой методологии учета критериев надежности при проектировании различных бортовых систем КА и аппарата в целом [5].

Исходя из известного постулата: «Надежность системы определяется **наиболее слабыми ее звеньями**», можно утверждать, что задача проектирования надежного КА может быть решена благодаря выявлению и устранению критичных звеньев, оптимизации его структуры по критериям надежности с учетом ограничений по массогабаритным, энергетическим и другим параметрам.

В силу структурной сложности ЭСУ КА, специфики условий её эксплуатации и малосерийности, возможности проведения экспериментальных исследований по анализу надежности ограниче-

ны. В этих условиях особое значение приобретает модельное исследование надежности, в ходе которого строятся формальные математические модели, отражающие особенности процессов возникновения отказов системы. Это позволяет проводить качественный и количественный анализ ее надежности, определять слабые звенья в системе и при необходимости наметать мероприятия по повышению надежности.

Кроме того, задача исследователя состоит в том, чтобы найти такие методы анализа надежности ЭСУ КА, которые не только позволяли бы получить количественные оценки надежности, но и были бы доступны инженеру-проектировщику и ориентировались на применение современных вычислительных средств.

2. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ НАДЕЖНОСТИ

2.1. Термины и определения

В документе [2] даются расширенные и конкретизированные определения, в дополнение к определениям, сформулированным на основе формального подхода [1].

Так, определение **надежности** вводится как *свойство готовности* и влияющие на него свойства *безотказности и ремонтпригодности*, при наличии установленного условиями эксплуатации *технического обслуживания*. Под **готовностью** понимается способность изделия выполнить требуемую функцию при данных условиях в предположении, что необходимые внешние ресурсы обеспечены.

В инженерно-технической практике [4] под **надежностью** также понимается способность изделия сохранить во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания после хранения и транспортирования.

Исходя из этого, различают следующие состояния изделия: *исправное и неисправное, работоспособное и неработоспособное, а также предельное*.

Исправным называется состояние изделия, характеризующееся его способностью выполнять требуемую функцию при условии, что предоставлены необходимые внешние ресурсы. Если имеет

место несоответствие хотя бы по одному из требований, то такое состояние называется *неисправным*.

Работоспособное состояние — это такое состояние изделия, при котором оно способно выполнять требуемую функцию при условии, что предоставлены необходимые внешние ресурсы.

Предельным состоянием называют состояние изделия, при котором оно еще сохраняет работоспособность, но его дальнейшая эксплуатация не допускается, исходя из условий экономичности, обеспечения безопасности либо других требований. Дальнейшая эксплуатация изделия после наступления предельного состояния с определенной степенью вероятности приведет его в состояние, при котором оно не способно выполнять заданные функции, — такое состояние называют **неработоспособным**. Критерий достижения предельного состояния регламентируется технической документацией.

Переходу изделия в неработоспособное состояние предшествует отказ, который с учетом изложенного в [2] определяется как событие, заключающееся в полной или частичной потере работоспособности.

Поскольку причину отказа могут обуславливать различные процессы, явления и события, исследование причин отказов невозможно без привлечения физической теории надежности и ряда смежных инженерных дисциплин.

При установлении причин отказов необходимо установить явления, процессы, события и состояния, а также возможное сочетание этих факторов, приводящие к возникновению отказов.

Преобладающими причинами отказов изделий на различных участках жизненного цикла могут быть [4]:

- на участке приработки — недостаточная изученность всей совокупности процессов, определяющих работу изделия;
- на участке нормальной эксплуатации — несоблюдение технических условий по функционированию изделия или параметрам внешнего воздействия;
- на участке интенсивного старения — износ, коррозия и старение материалов.

Нагрузки, воздействующие на узлы изделия, можно разделить на две *группы*:

а) нагрузки, обусловленные функционированием технического устройства;

б) нагрузки, обусловленные внешними воздействующими факторами.

Для деталей энергосиловых установок КА определяющими являются механические, тепловые и электрические нагрузки. Как правило, детали и узлы подвергаются одновременному воздействию нескольких видов нагрузок [7].

Несущая способность элемента изделия определяется свойствами используемых материалов, конструктивным исполнением, соблюдением правил эксплуатации. При превышении действующих нагрузок над несущей способностью наступает **отказ**.

Факт отказа определяют на основании **критериев отказа**, установленных нормативно-технической документацией [2, 4]. Отказ может быть выявлен по внешним признакам или по телеметрии при выходе параметров за установленные пределы.

Вид отказа характеризуется его технической сущностью, которая устанавливается после проведения диагностических мероприятий или идентификационного анализа. Задача указанных мероприятий состоит в определении явления, процесса, события или состояния изделия, вызвавших отказ.

2.2. Процессы механического разрушения

Механизм разрушения и долговечность материала определяются постепенным накоплением локальных дефектов — деформаций и трещин в материале. Локальные дефекты материала, создавая локальные перенапряжения, становятся центрами разрушения [7].

Внешние факторы, воздействующие на материал, могут существенно повлиять на работоспособность, сохраняемость изделия и время наработки до отказа.

Скорость процессов механического разрушения деталей зависит от структуры и свойств материала, геометрической формы и состояния поверхности, от напряжений, определяемых нагрузкой и температурой.

Отказом по параметрам прочности могут быть события, связанные с разрушением изделия или с недопустимой деформацией. Показателем, характеризующим наработку до наступления такого события, может служить, например, средняя наработка до отказа.

Предельным состоянием изделий по критериям прочности могут быть события, связанные с накоплением определенного числа

циклов нагружения, с недопустимым изменением параметров прочности, с накоплением пластических деформаций и т.п.

Для характеристики надежности по параметрам прочности нередко используется термин **прочностная надежность** [5,7]. Под этим термином понимается способность машин, конструкций и их элементов сохранять во времени работоспособное состояние при воздействии на него внешних нагрузок.

Прочность — свойство материала (в определенных условиях и пределах) сопротивляться разрушению, а также изменению формы под действием внешних или внутренних нагрузок. Параметрами прочности являются пределы *прочности, текучести, ползучести, выносливости* и др.

Деформация — это изменение формы или размеров изделия или его части под действием внешних сил, при нагревании, охлаждении, изменении давления, влажности и т.п. Различают два вида деформации: упругую (исчезающую после устранения воздействий, вызвавших деформацию) и пластическую (оставшуюся после удаления нагрузки). При деформации может происходить растяжение, сжатие, изгиб, сдвиг, изменение вида объекта. Основными параметрами деформационных характеристик являются *относительное остаточное удлинение и уменьшение площади поперечного сечения*.

При работе изделий в условиях высоких температур важной характеристикой прочностной надежности является ресурс по *ползучести*.

Ползучесть — это явление, заключающееся в том, что металл, нагруженный при высокой температуре, непрерывно деформируется под воздействием постоянных во времени напряжений. В результате ползучести происходит ослабление сопротивляемости материала воздействию нагрузок. При этом напряжения, вызывающие разрушения, могут быть значительно меньше временного сопротивления при данной температуре. Способность материала сопротивляться разрушению при воздействии высокой температуры и напряжений характеризуется *пределом длительной прочности*, т.е. напряжением, приводящим металл к разрушению (при данной температуре).

Особое место в причинах отказов по параметрам прочности занимает **трещинообразование**. Процесс трещинообразования не носит внезапный характер, он состоит из последовательного объединения соседних микротрещин и ускорения роста одной из них.

Такая трещина называется конечной, и именно она приводит к усталостному разрушению.

Изнашивание является одной из основных причин предельных состояний и отказов. Под изнашиванием понимается процесс разрушения и отделения материала от поверхности твердого тела и (или) накопление его остаточной деформации при трении, проявляющееся в постепенном изменении размеров и (или) формы тела.

Показателями, характеризующими *трибологическую надежность*, в большинстве случаев могут быть показатели, выраженные через скорость и интенсивность изнашивания. *Скорость изнашивания* — это отношение износа к интервалу времени, в течение которого он возник. Обычно различают мгновенную (в определенный момент времени) и среднюю (за определенный интервал времени) скорость изнашивания. *Интенсивность изнашивания* определяется как отношение значения износа к длине пути, на котором происходило изнашивание. Изнашивание может происходить как при контакте твердых тел, так и при контакте твердых тел с жидкими рабочими телами и потоками ионизированного газа (плазмы) [6].

2.3. Физико-химические процессы разрушения

Физико-химические процессы, приводящие к отказам, могут быть классифицированы на *группы* [8] в зависимости от вида материала, места протекания процесса, вида энергии, определяющего характер процесса, вида эксплуатационного воздействия (внутреннего механизма) процесса.

Химическая энергия вызывает процессы коррозии в элементах изделия. Повреждение поверхностей деталей может привести вначале к ухудшению выходных параметров изделия, а затем при существенном их разрушении к полному выходу из строя изделия, т.е. к отказу. Изнашивание, коррозия, усталость, деформация деталей с течением времени являются необратимыми процессами в изделиях и могут протекать с различной скоростью.

Быстропротекающие процессы имеют длительность, обычно соизмеримую с циклом работы изделия, который значительно меньше общего времени эксплуатации изделия. Эти процессы возникают в начале цикла работы изделия и заканчиваются при его окончании.

Медленные процессы происходят в течение всего времени работы изделия от начала до окончания эксплуатации. К таким про-

цессам относятся необратимые процессы старения, ползучесть металлов, коррозия, усталость материалов, перераспределение внутренних напряжений в деталях и др.

Во всех используемых в машиностроении деталях из кристаллических твердых материалов имеются элементарные первичные дефекты кристаллической структуры, которые при определенных условиях эксплуатации могут явиться причиной отказов. Образование дефектов и их перемещение в твердом теле под воздействием тепла и различных внешних факторов может привести к деформации элементов и их разрушению. Дефекты приводят также к изменению электрофизических свойств материала.

Под **коррозионной надежностью** понимается свойство изделий сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в условиях взаимодействия с коррозионной средой. Коррозия может не только являться процессом, приводящим к отказам, но и ускорять процессы изнашивания, усталостного разрушения, снижать прочностные и деформационные свойства материалов [8].

Коррозия — это разрушение металла вследствие химического или электрохимического взаимодействия их с коррозионной средой (агрессивная атмосфера, растворы кислот, щелочей, солей и т.п.). Критериями отказов по **параметрам коррозии** может быть *величина коррозии* или *ее скорость*. В тех случаях, когда бывает необходимо регламентировать или оценить надежность изделий в зависимости от коррозионного разрушения или провести ее оценку при различных видах коррозии, могут использоваться такие показатели, как *средняя наработка на отказ при коррозии*, *срок сохраняемости при коррозии* и др. В результате коррозии могут происходить следующие события [5]:

- разрушение детали из-за коррозии;
- достижение недопустимого изменения массы или толщины металла под действием процесса коррозии;
- появление коррозионного очага на поверхности изделия;
- превышение допустимого уровня скорости коррозии или скорости проникновения коррозии и др.

Специфической особенностью отказов из-за коррозии является то, что в большинстве случаев они могут происходить как при функционировании, так и при хранении изделий.

Виды коррозии при этом могут быть различными. Различают **электрохимическую** и **химическую** коррозии.

Электрохимическая коррозия — это взаимодействие металла с коррозионной средой (раствором электролитов), при котором ионизация атомов металла и восстановление окислительной компоненты коррозионной среды протекают не в одном акте и их скорости зависят от электродного потенциала. Электрохимическая коррозия может появиться во всех случаях, когда есть граница раздела фаз металл—электролит, независимо от природы и количества электролита.

Под **химической коррозией** понимается взаимодействие металла с коррозионной средой, при котором окисление металла и восстановление окислительной компоненты коррозионной среды протекают одновременно.

На скорость коррозии оказывают влияние *внутренние* и *внешние* факторы.

К внутренним факторам относятся: химический состав и структура металла, состояние его поверхности, наличие напряжений и т.п. Причем с увеличением неоднородности составов и структуры наблюдается возрастание скорости коррозии.

К внешним факторам относятся: вид и состав окружающей среды и условия, при которых протекают физико-химические процессы (температура, давление, скорость потока и т.д.).

Для обеспечения коррозионной стойкости используют в основном два метода [8]: отделение металла от агрессивной среды и придание среде необходимых антикоррозионных свойств.

Первый способ может обеспечиваться конструктивными и (или) технологическими мероприятиями. К конструктивным мероприятиям по повышению *коррозионной стойкости* относятся способы предохранения от проникновения агрессивных сред, а также способы электрохимической защиты. Мероприятия по предотвращению или ослаблению *электрохимической коррозии* затрудняют или исключают протекание электрического тока через металл или раствор либо уменьшают разность потенциалов двух элементов металлической конструкции.

Старением материалов называются процессы изменения их физико-механических свойств во времени в условиях длительного хранения или эксплуатации. Обычно старение обусловлено недо-

статочно стабильным (неравновесным) состоянием материала и постепенным его переходом в стабильное (равновесное) состояние.

Старение материала может приводить как к улучшению, так и к ухудшению отдельных свойств материалов. Во многих случаях технологическими процессами предусматриваются операции искусственного старения материалов с целью улучшения их свойств. К старению металлов и сплавов следует относить все процессы изменения во времени их свойств, связанные с превращениями металлов и сплавов в твердом состоянии.

Эти процессы можно разделить на *две группы*: процессы превращения, связанные только с изменением кристаллической структуры, которые протекают без изменения химического состава образующихся при превращении фаз, и превращения, сопровождающиеся образованием фаз с измененным химическим составом.

Разрушение твердых диэлектриков под действием электрического тока может быть *двух видов* [6]: **пробой** толщины материала и **разряд** по его поверхности. Наибольшие разрушения вызывает *электрический пробой* материалов.

Диэлектрики обладают определенной электрической прочностью, характеризуемой критической напряженностью электрического поля (пробивной напряженностью $E_{пр}$), при которой начинается резкий рост электропроводимости. При эксплуатации оборудования разрушение изоляции происходит в результате комбинированного действия ряда факторов: напряжения, температуры, загрязнений на поверхности; таких дефектов материалов, как поры, трещины, посторонние включения; старения материалов и т.д.

В зависимости от значений пробойного напряжения и критической температуры выделяют различные формы пробоя: чисто электрический пробой в области низких температур и тепловой пробой в области повышенных температур. Длительность действия напряжения до *электрического пробоя* составляет для разных материалов и при разных уровнях давления $10^{-8} \dots 10$ с, пробивная напряженность — $10^6 \dots 10^7$ В/см, соответственно длительность действия напряжения до *теплого пробоя* $0,10 \dots 10^4$ с, напряженность $10^4 \dots 10^5$ В/см.

Наиболее вероятным механизмом электрического пробоя твердых диэлектриков является ударная ионизация электронами или ионами.

3. МАТЕМАТИЧЕСКИЙ АППАРАТ ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ

3.1. События в теории надежности

Изделия в теории надежности подразделяют на два базовых класса [4]:

- **невосстанавливаемые** — изделия, которые не могут быть восстановлены потребителем и подлежат замене;
- **восстанавливаемые** — изделия, которые могут быть восстановлены потребителем.

Следует отметить [5], что в условиях технического прогресса, когда возможно, в принципе, выполнять любой ремонт (даже космические объекты на орбите могут подвергаться ремонту), подразделение изделий на восстанавливаемые и невосстанавливаемые определяется прежде всего экономической целесообразностью затрат на восстановление и замену отказавшего изделия.

Элемент, входящий в структурную схему надежности (СШ) системы и определяющий работоспособность системы в целом, называют **основным элементом**. Элемент, который включается в работу при отказе основного элемента, называют **резервным элементом**.

В теории надежности **отказ** является фундаментальным понятием, так как все расчеты и испытания на надежность имеют целью оценку вероятности момента и условий наступления отказа, а также определение мероприятий, увеличивающих период работы изделия до отказа.

Возникновение отказа — основное событие, характеризующее надежность изделия или элемента.

Различают **полный отказ**, при котором прекращается выполнение функций рассматриваемым элементом, и **отказ функционирования**, при котором значения параметров объекта выходят за пределы, установленные техническими условиями.

Причины отказов можно разделить на *две группы* [4]:

- **случайные** — это причины, которые невозможно предусмотреть и устранить в процессе изготовления изделия;
- **систематические** — это закономерные явления, ведущие к постепенному накоплению повреждений.

В соответствии с этими причинами и характером развития и проявления отказы подразделяют на следующие виды:

- **внезапные** (поломки от перегрузок, разрушения элементов в экстремальных условиях);
- **постепенные по развитию и внезапные по проявлению** (усталостные разрушения, короткие замыкания от старения изоляции);
- **постепенные** (износ, старение, коррозия).

Внезапные отказы из-за своей неожиданности и непредсказуемости очень опасны. Постепенные отказы связаны с выходом значений параметров за границы допуска в процессе эксплуатации или хранения.

Отказы изделий возникают по двум основным причинам [5]:

- из-за несовершенства конструкторской и технологической документации, регламентирующей изготовление, ремонт и эксплуатацию;
- из-за нарушения требований, установленных технической документацией.

Отказ, возникший из-за несовершенства конструкторской документации, называют **конструкционным отказом**. Характерная особенность конструкционных отказов состоит в том, что причины отказов для всей партии деталей являются общими. *Повторяемость отказов* облегчает выявление их причин и позволяет дорабатывать изделия с целью повышения их надежности.

При нарушении требований документации во время изготовления или ремонта возникают **производственные отказы**, а при нарушении условий эксплуатации — **эксплуатационные**. Производственные и эксплуатационные отказы, как правило, проявляются на конкретных изделиях и не имеют систематического характера.

3.2. Показатели надежности

Требования к надежности изделий и методы контроля их соблюдения являются основными элементами *управления надежностью* [5]. Требования к надежности определяются в соответствующих технических документах: технических заданиях, стандартах, технических условиях и др.

Получать устойчивые количественные показатели свойств и состояний изделий (в аспекте проблемы надежности) можно, как правило, лишь при достаточно больших объемах статистических

данных, поэтому для количественного описания свойств изделий широко применяют вероятностные и статистические методы.

Параметры надежности в *статистической* трактовке используют для **оценки состояния изделия**, а в *вероятностной* трактовке — для прогнозирования.

Номенклатуру показателей надежности изделий выбирают в зависимости от класса изделий, режимов их эксплуатации, характера отказов и их последствий, а также в зависимости от принципа ограничения длительности эксплуатации.

Для конкретного изделия следует выбирать *минимально необходимое* число показателей, достаточно полно определяющих его надежность. При этом показатели надежности должны обеспечивать возможность их количественной оценки *на этапе разработки*, а также возможность *подтверждения их методами испытаний*.

При выборе номенклатуры показателей надежности необходимо руководствоваться государственными стандартами и отраслевыми нормативно-техническими документами [1, 2].

3.3. Надежность элементов

Вероятность безотказной работы (ВБР) — вероятность того, что в пределах заданной наработки отказ не возникает. ВБР выражается в виде десятичной дроби или в процентах, показывающих вероятное или ожидаемое число изделий, которые будут безотказно функционировать в течение заданного периода времени.

Пусть элемент начинает работу в момент времени $t = 0$, а в момент $t = T$ происходит отказ. Интервал работы элемента от 0 до T называется **наработкой до отказа**. Нарботка до отказа является непрерывной случайной величиной, распределенной по закону $Q(t)$. Функция $Q(t)$ есть вероятность отказа элемента до времени t . Исходя из того что работоспособное состояние и состояние отказа образуют полную группу несовместных событий, сумма их вероятностей равна единице. Тогда вероятность безотказной работы будет равна $P(t) = 1 - Q(t)$. Примерный вид функции $P(t)$ показан на рис. 3.1. Эта функция монотонно убывает от значения $P(0) = 1$ до значения $P(t) \rightarrow 0$ при $t \rightarrow \infty$.

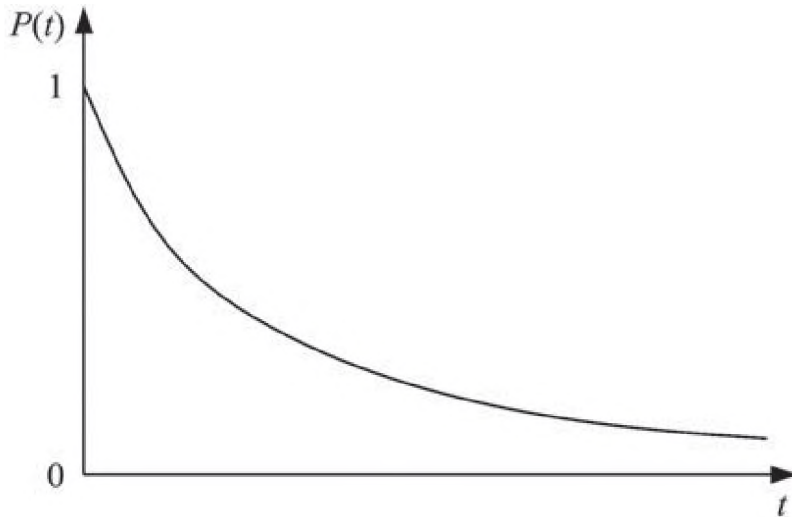


Рис. 3.1. Кривая убывающей функции $P(t)$

Статистической оценкой $P^*(t)$ ВБР является отношение числа N работоспособных элементов в момент t к общему числу N_0 элементов, поставленных на испытание:

$$P(t) \approx P^*(t) = \frac{N_t}{N_0} .$$

Очевидно, что функция $P^*(t)$ равномерно приближается к функции $P(t)$ при увеличении числа N_0 .

Вероятность безотказной работы $P(t)$ как случайная функция на практике может быть распределена по вполне определенному закону.

При известном законе распределения отказов, выраженном функцией $Q(t)$, плотность распределения отказов $F(t)$ будет определена выражением $F(t) = \frac{dQ(t)}{dt}$. В статистической форме плотность распределения отказов можно представить в виде

$$F(t) \approx F^*(t) = \frac{\Delta Q(t)}{\Delta t} .$$

Учитывая, что статистическая оценка вероятности отказа элемента в период от 0 до t есть отношение числа $n(t)$ отказавших элементов к числу N_0 элементов, поставленных на испытания, и что вероятность отказа

$$Q(t) \approx Q^*(t) = \frac{n(t)}{N_0},$$

плотность распределения отказов можно определить как

$$F(t) = \frac{\Delta Q(t)}{\Delta t} = \frac{\Delta n(t)}{N_0 \Delta t} = \frac{n(t + \Delta t) - n(t)}{N_0 \Delta t}.$$

Широко используется функция $\lambda(t)$, называемая **интенсивностью отказов**. Интенсивность отказов выражается отношением числа отказов в единицу времени к числу работоспособных элементов:

$$\lambda(t) = - \frac{P'(\Delta t)}{P(0, t)}.$$

Тогда $Q(\Delta t) = \lambda(t)\Delta t$.

Величина $\lambda(t)$ является **локальной характеристикой надежности**, определяющей надежность элемента в каждый рассматриваемый момент времени.

Интенсивность отказов может быть определена по результатам испытаний:

$$\lambda(t) = - \frac{P'(\Delta t)}{P(0, t)} \approx - \frac{P^*(\Delta t)}{\Delta t P^*(0, t)} = \frac{P^*(0, t) - P^*[0, (t + \Delta t)]}{\Delta t P^*(0, t)}.$$

Выражение для интенсивности отказов можно представить в другой форме. Обратимся к формуле $\lambda(t) = - \frac{P'(\Delta t)}{P(0, t)}$. Исходя из того

что $Q(t) = 1 - P(t)$, имеем $Q(t) = -P'(t)$, но производная функции распределения равна плотности распределения: $Q'(t) = F(t)$. Получим окончательное выражение:

$$\lambda(t) = \frac{F(t)}{P(t)}.$$

Если рассмотреть кривую надежности, то можно установить, что с течением времени значения ВБР уменьшается. Какой бы уровень надежности в начале работы ни имело изделие, всегда наступает момент, когда оно станет неработоспособным.

Время работы элемента до отказа называется **наработка до отказа** T .

Средняя наработка до отказа есть математическое ожидание непрерывной случайной величины T , которое определяется выражением

$$T_{\text{ср}} = \int_0^{\infty} t F(t) dt = - \int_0^{\infty} t dP(t).$$

Если функция $P(t)$ известна, то при заданном значении вероятности безотказной работы можно определить наработку до отказа с заданной вероятностью.

Если проинтегрировать по частям выражение, определяющее значение средней наработки до отказа, и учесть, что при $t = \infty$ функция надежности $P(t) = 0$, можно показать, что

$$T_{\text{ср}} = \int_0^{\infty} P(t) dt.$$

Таким образом, вероятность безотказной работы в условиях случайных отказов можно выразить зависимостью

$$P(t) = e^{-\frac{1}{T_{\text{ср}} t}},$$

так как $\lambda = \frac{1}{T_{\text{ср}}}$.

С учетом разложения показательной функции e^{-x} в ряд Тейлора

$$e^{-x} = 1 - x + \frac{x^2}{2!} - \frac{x^3}{3!} + \dots + (-1)^{n-1} \frac{x^n}{n!}$$

и принимая во внимание уменьшение значимости членов ряда, можно записать: $P(t) = e^{-\lambda t} \approx 1 - \lambda t$.

Для деталей и узлов ракетно-космической техники требуется высокая вероятность безотказной работы — $P(t)$ от 0,99 до 0,999, что определяет допустимые значения λt .

4. СТРУКТУРНАЯ НАДЕЖНОСТЬ

4.1. Структурные схемы надежности

Всякое (не элементарное) изделие состоит из частей или элементов, тем или иным образом соединенных между собой и воздействующих друг на друга.

Для того чтобы рассчитать надежность (безотказность) изделия или системы, необходимо знать характеристики надежности отдельных частей или элементов изделия.

Структурной надежностью изделия (системы) называют результирующую надежность (безотказность) изделия при заданной его структуре, т.е. при известном порядке соединения и известных значениях надежности всех входящих в него частей и элементов.

В теории надежности соединения элементов различаются в зависимости от того, как надежность отдельных элементов влияет на надежность всего соединения.

Под словом “соединение” понимается группа или система элементов, соединенных между собой определённым образом.

В этом смысле различают два простейших способа соединений элементов: *последовательное* и *параллельное*.

Последовательным в теории надежности называют такое соединение элементов, при котором отказ одного элемента приводит к отказу всего соединения. Структурная схема последовательного соединения представлена на рис. 4.1.

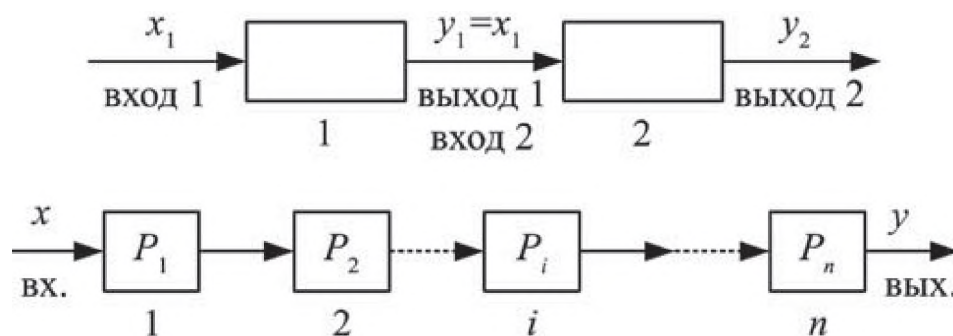


Рис. 4.1. Последовательное соединение элементов

Следует помнить, что техническое понятие последовательного соединения может не совпадать с понятием последовательного соединения в смысле надежности.

Условимся считать, что вероятность безотказной работы одних элементов не зависит от вероятности безотказной работы других [9], т.е. отказ или изменение надежности одной группы элементов не влияет на вероятность безотказной работы других. В этом случае элементы называют **независимыми** в смысле надежности. На практике во многих случаях элементы можно считать независимыми.

Для последовательного соединения независимых элементов вероятность безотказной работы определяется (согласно теореме умножения вероятностей) как произведение вероятностей безотказной работы его элементов:

$$P_{\Sigma}(t) = P_1 \cdot P_2 \cdot P_3 \cdot \dots \cdot P_n = \prod_{i=1}^{i=n} P_i.$$

В случае экспоненциального закона надёжности для всех элементов, когда $\lambda_i(t) = \lambda_i = \text{const}$, имеем

$$\lambda_{\Sigma} = \lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_i + \dots + \lambda_n = \text{const}$$

и

$$P(t) = e^{-(\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_i + \dots + \lambda_n)t} = e^{-\lambda_{\Sigma} t}.$$

Таким образом, функция надежности последовательного соединения также является экспоненциальной функцией, характеризующей интенсивность отказов λ_{Σ} .

Если у элементов одна и та же интенсивность отказов, т.е.

$$\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_i = \lambda_n = \lambda,$$

то

$$P(t) = P^n(t) = e^{-n\lambda t} = e^{-\lambda_{\Sigma} t},$$

где

$$\lambda_{\Sigma} = n\lambda.$$

Пусть задана вероятность безотказной работы последовательного соединения в течение времени t . Требуется определить, какая

при этом допустима максимальная суммарная интенсивность отказов соединения λ_{Σ} . Все элементы имеют экспоненциальные функции надежности.

Для последовательного соединения

$$P = e^{-\lambda_{\Sigma} t}.$$

Логарифмируя обе части этого выражения, находим

$$\ln P = -\lambda_{\Sigma} t,$$

откуда определяем

$$\lambda_{\Sigma} \leq \left| \frac{\ln P}{t} \right|.$$

Параллельным (в смысле надежности) называют такое соеди-

нение элементов, в котором отказ всего соединения (системы) наступает только тогда, когда отказывают все входящие в это соединение (систему) элементы.

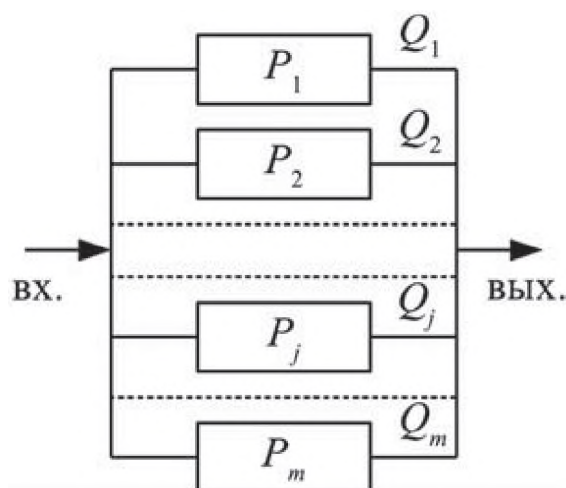


Рис. 4.2. Параллельное соединение элементов

Схема параллельного соединения элементов приведена на рис. 4.2.

Будем, как и при рассмотрении последовательного соединения, считать элементы независимыми, т.е. считать, что вероятность безотказной работы одних элементов не зависит от отказа других.

Если вероятности безотказной работы элементов равны $P_1; P_2; P_j; \dots; P_m$, то вероятности их отказа определяются соответственно:

$$Q_1 = 1 - P_1; \quad Q_2 = 1 - P_2;$$

$$Q_j = 1 - P_j; \quad Q_m = 1 - P_m.$$

Вероятность Q отказа всего соединения реализуется в случае отказа всех его элементов. По теореме умножения вероятностей имеем:

$$Q = Q_1 \cdot Q_2 \cdot \dots \cdot Q_j \cdot \dots \cdot Q_m = \prod_{j=1}^{j=m} Q_j = \prod_{j=1}^{j=m} (1 - P_j).$$

Вероятность безотказной работы системы параллельно соединенных элементов:

$$P = 1 - Q = 1 - Q_1 \cdot Q_2 \cdot \dots \cdot Q_m = 1 - \prod_{j=1}^{j=m} Q_j = 1 - \prod_{j=1}^{j=m} (1 - P_j).$$

Если функции надежности у всех элементов являются экспоненциальными, получаем:

$$P = 1 - (1 - e^{-\lambda_1 t}) \cdot (1 - e^{-\lambda_2 t}) \cdot \dots \cdot (1 - e^{-\lambda_j t}) \cdot \dots \cdot (1 - e^{-\lambda_m t}).$$

Отсюда видно, что функция надежности системы параллельно соединенных элементов (в отличие от последовательного соединения) уже не является экспоненциальной.

При экспоненциальном законе надежности для всех элементов имеем:

$$Q = (1 - e^{-\lambda t})^m;$$

$$P = 1 - (1 - e^{-\lambda t})^m.$$

4.2. Надежность невосстанавливаемых систем

Под **системой** понимается объект, предназначенный для выполнения заданной функции, который может быть разделен на отдельные элементы. Как уже отмечалось ранее, понятия системы и элемента условны, они трактуются исходя из решаемой конкретной задачи надежности.

С позиции надежности сложная система обладает как отрицательными, так и положительными свойствами [3]. Фактором, отрицательно влияющим на надежность систем, является большое число элементов, отказ каждого из которых может привести к отказу всей системы.

Фактор, положительно влияющий на надежность систем, определяется возможностью предусмотреть резервирование, исключая отказ системы при отказе основного элемента.

При анализе надежности системы все ее элементы целесообразно сгруппировать по степени их влияния на систему в целом:

- элементы, отказ которых практически не влияет на работоспособность системы;
- элементы, работоспособность которых практически не изменяется;
- элементы, отказ которых приводит к отказу системы.

В теории надежности все они подлежат анализу.

Большинство систем энергоустановок представляют последовательное (в смысле надежности) соединение невосстанавливаемых элементов, т.е. отказ одного элемента приводит к отказу в целом системы. Необходимо иметь в виду, что последовательное соединение элементов в смысле надежности не обязательно означает, что реальное соединение этих элементов будет последовательным. Условно такая система изображена на рис. 4.3.

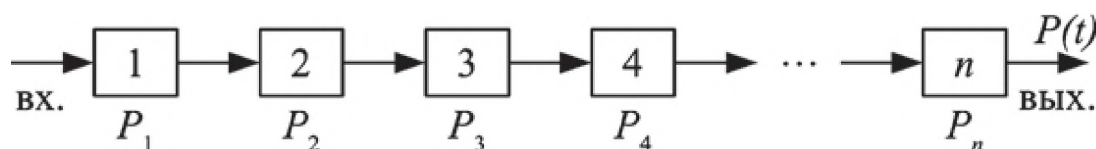


Рис. 4.3. Схема системы с последовательным соединением элементов

Вероятность безотказной работы системы, состоящей из последовательных (в структурной схеме надежности) элементов при одинаковой надежности элементов $P_1 = P_2 = P_3 = \dots = P_n \sim P(t)$

$$P_c(t) = P^n(t).$$

Если надежность элементов определяется на этапе жизненного цикла, называемом участком нормальной эксплуатации, то

$$P_n = e^{-\lambda_n t}.$$

Произведя подстановку и принимая интенсивность отказов системы $\lambda_c = \sum_n \lambda_i$, получим:

$$P_c = e^{-\lambda_c t}.$$

То есть надежность системы в данном случае также подчиняется экспоненциальному закону.

Повышение надежности систем из невозстанавливаемых элементов возможно с использованием **резервных элементов** — это один из основных методов повышения надежности, при котором используются дублирующие элементы. При выходе из строя одного из элементов дублер выполняет его функции, и работоспособность системы сохраняется.

При **постоянном резервировании (нагруженный резерв)** резервные элементы подключают параллельно основным (рис. 4.4). Вероятность отказа всех элементов по теореме умножений вероятностей:

$$Q_c(t) = Q_1 \cdot Q_2 \cdot \dots \cdot Q_n = \prod_{i=1}^n Q_i(t),$$

где $Q_i(t)$ — вероятность отказа i -го элемента; n — число элементов в системе.

Вероятность безотказной работы системы с нагруженным резервом:

$$P_c(t) = 1 - Q_c(t) = 1 - \prod_{i=1}^n Q_i(t) = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - P_i(t)].$$

Резервирование значительно повышает надежность системы. Например, если $P(t) = 0,9$, а $n = 3$, то $P_c(t) = 1 - [1 - 0,9]^3 = 0,999$.

При **резервировании замещением (ненагруженный резерв)** резервные элементы включаются только при отказе основных. Это включение может производиться автоматически или вручную (рис. 4.5).

Резервирование переключением на резервный элемент более эффективно, чем постоянное, так как

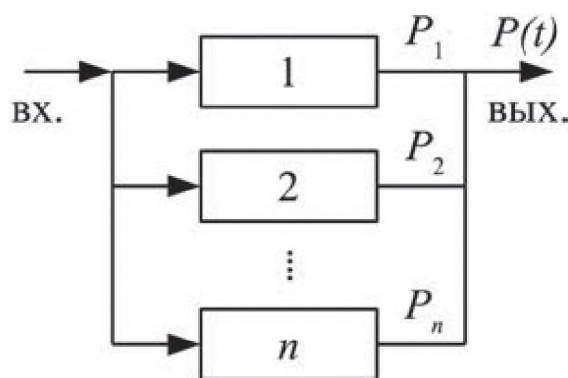


Рис. 4.4. Схема нагруженного резервирования элементов

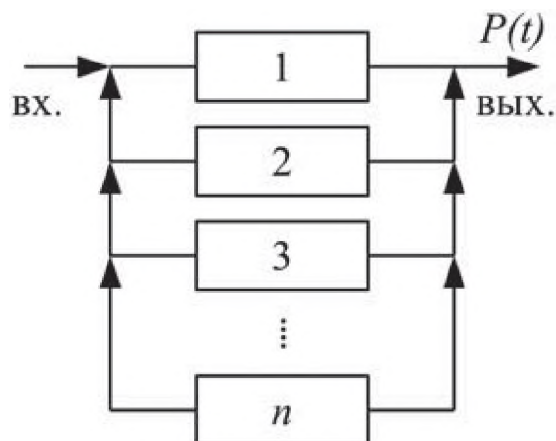


Рис. 4.5. Схема ненагруженного резервирования элементов

резервный элемент сохраняет свою работоспособность к моменту его включения в работу. Однако при этом возникает необходимость включения в состав системы механизмов переключения. Сохранение параметров системы в период переключения представляет собой достаточно сложную задачу, поэтому резервирование замещением применяют в тех случаях, когда допускается хотя бы кратковременный перерыв в работе системы.

Существует метод повышения надежности с использованием резервирования, заключающийся в постоянном подключении резервных элементов, работающих в облегченном режиме до отказа основных элементов (**слабонагруженный резерв**). В этом случае резервные элементы сохраняют свою работоспособность дольше, чем при нагруженном резерве, а время на переключение меньше, чем при ненагруженном.

Отдельную задачу представляет собой **резервирование систем**. Рассмотрим систему, состоящую из m цепей с n последовательно соединенными элементами в каждой цепи.

Существуют два способа резервирования системы: общее и отдельное.

Общее резервирование системы означает, что при выходе из строя любого элемента включается резервная цепь, которая полностью заменяет основную (рис. 4.6).

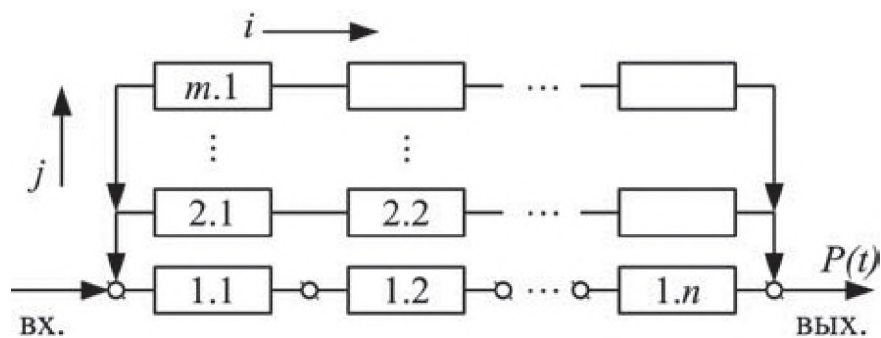


Рис. 4.6. Схема общего резервирования системы

Раздельное резервирование обеспечивает возможность включения в системе резервного элемента при выходе любого основного в условиях нагруженного резерва. Схема раздельного резервирования изображена на рис. 4.7.

Каждый из n включенных в цепь элементов имеет $(m-1)$ резервных элементов, которые поочередно подключаются по мере отказа основного элемента.

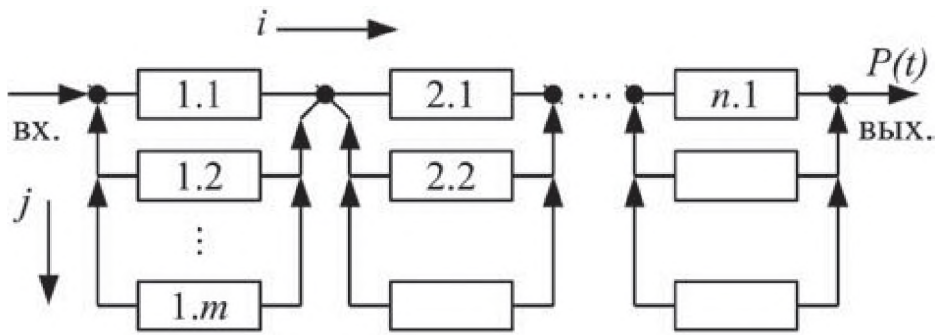


Рис. 4.7. Схема отдельного резервирования системы

4.3. Сравнение систем с общим и отдельным резервированием по массе и стоимости

Применение постоянного резервирования, естественно, приводит к увеличению массы системы, её габаритов и стоимости. Сравним увеличение массы системы при обоих видах резервирования, когда требуется получить одну и ту же надежность системы.

Масса системы без резервирования и масса системы с резервированием связаны между собой соотношением:

$$G = mG_0,$$

где G_0 — масса системы без резервирования; G — масса системы с резервированием; m — число параллельных цепей.

Для общего резервирования получаем

$$m_{\text{общ}} = \frac{G_{\text{общ}}}{G_0} = \frac{\lg(1 - P_{\text{общ}})}{\lg(1 - P^n)} = \frac{\lg(1 - P_{\text{общ}})}{\lg(1 - P_0)},$$

где $P_0(t) = P^n(t)$ — вероятность безотказной работы нерезервированного варианта системы.

Для отдельного резервирования получаем

$$m_{\text{разд}} = \frac{G_{\text{разд}}}{G_0} = \frac{\lg(1 - P_{\text{разд}}^{1/n})}{\lg(1 - P_0)}.$$

Пусть стоимость нерезервированной системы равна C_0 . Примем в первом приближении, что стоимость C_c резервированной системы пропорциональна числу параллельно включенных цепей m . Тогда

$$C_c = mC_0.$$

Пусть заданная вероятность безотказной работы резервированной системы равна P_c .

Для любого типа резервирования вероятность безотказной работы системы выражается формулой

$$P_c(t) = [1 - (1 - P^s)^m]^r.$$

Решая выражение относительно m и учитывая $C_c = mC_0$, получаем

$$\frac{C_c}{C_0} = m = \frac{\lg(1 - P_c^{1/r})}{\lg(1 - P^s)}.$$

Для случая общего резервирования ($r = 1$ и $s = n$) получаем

$$\frac{C_c}{C_0} = \frac{\lg(1 - P_c)}{\lg(1 - P^n)} = \frac{\lg(1 - P_c)}{\lg(1 - P_0)},$$

так как $P_0(t) = P^n(t)$ — вероятность безотказной работы нерезервированной системы.

Для случая отдельного резервирования ($r = n$ и $s = 1$) получаем:

$$\frac{C_c}{C_0} = \frac{\lg(1 - P_c^{1/n})}{\lg(1 - P)} = \frac{\lg(1 - P_c^{1/n})}{\lg(1 - P_0^{1/n})}.$$

5. ОСОБЕННОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ЭНЕРГОСИЛОВЫХ УСТАНОВОК КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Энергосиловая установка (ЭСУ) относится к числу важнейших бортовых систем КА, рациональный выбор и техническое совершенствование которой в значительной мере определяет конструктивные совершенство КА, его массу, габариты, эксплуатационные характеристики и срок активного существования.

К особенностям определения надежности ЭСУ КА относятся проблемы, связанные с физической и структурной надежностью, а также с их экспериментальной проверкой.

Энергоустановка (ЭУ) совместно с двигательной установкой (ДУ) и подсистемой хранения рабочего тела входит в состав структуры всей энергосиловой установки, поэтому от их надежности зависят надежность и рабочие параметры ЭСУ в целом. Для успешного выполнения программы полёта требуется унификация разных типов установок по мощности и массе, выводимой на орбиту.

Наиболее полно надежность ЭСУ [5] оценивается ее качеством, выявленным по сравнительной экономичности выполнения разных программ полёта. Рассматривается стоимость C_i (i -го варианта программы полёта), сопоставленная с базовой стоимостью C_b (варианта программы полёта без учёта стоимости резервных звеньев), которая определяет качество того или иного варианта выполнения программы:

$$C_{\downarrow} = \frac{(C_b - C_i)}{C_b} = \frac{\Delta C_i}{C_b}.$$

Однако с помощью только стоимостных критериев не всегда можно объективно выбрать тип ЭСУ. Поэтому наряду со стоимостными критериями используется **массовый критерий** качества, определяющий долю полезного груза в общей массе аппарата:

$$\overline{M}_{\Pi} = \frac{M_{\Pi}}{m_{\Sigma}}.$$

Относительная масса энергосиловой установки $\overline{M}_{\text{ЭСУ}}$ может рассматриваться как самостоятельный критерий качества. С ее

уменьшением растёт доля массы полезного груза в общей массе КА. $\overline{M}_{ЭСУ}$ определяется такими основными параметрами, как энерговооруженность летательного аппарата и удельная масса энергетической установки.

Проектные исследования надежности ЭУ включают разработку моделей, определяющих работоспособность установки на различных стадиях срока активного существования. Вероятностный показатель надежности контролируется специальными испытаниями на надежность и обеспечивается не только дальнейшим совершенствованием схемных решений ЭСУ в целом, но и резервированием ряда ее подсистем.

При задании требований по надежности, еще на стадии технического задания, на уровне согласования варианта ЭСУ определяются: режимы ее эксплуатации, уровни внешних воздействующих факторов и нагрузок.

В качестве исходных данных для расчета ЭСУ и ее подсистем принимаются эксплуатационные показатели надежности, от которых зависят: выполнение траекторной задачи полета, сроки выполнения программы и циклограмма энергопотребления, масса полезной нагрузки и другие её характеристики.

Надежная работа системы зависит от многих факторов [5], которые можно разделить на **объективные** и **субъективные**. К объективным факторам относятся внешние воздействия (механические, радиационные и др), старение, износ, динамические нагрузки и т.п. К субъективным факторам относятся: выбор схемы и ее конструктивное выполнение, выбор элементов и материалов конструкции, режимов эксплуатации и др.

Так как решающее влияние на надежность оказывают эксплуатационные факторы, то **вероятность нормального функционирования в процессе эксплуатации** является одной из наиболее полных количественных характеристик безотказной работы системы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. СМС ISO 9000:2005. Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь.

2. ГОСТ Р 53480-2009. Надёжность в технике. Термины и определения.

3. Надёжность и эффективность в технике: Справочник в 10 т. / Ред. совет: В.С. Авдеевский и др. — М.: Машиностроение, 1986.

4. Труханов В.М. Надёжность в технике. — М.: Машиностроение, 1999. — 597 с.

5. Краев М.В., Назаров В.П., Краев В.М., Яцуненко В.Г. Надёжность автономных энергетических установок. — Красноярск: САА, 2001. — 286 с.

6. Яковлев Е.А. Испытания космических электроракетных двигательных установок. — М.: Машиностроение, 1981. — 208 с.

7. Латышев Л.А., Яковлев Е.А., Ким В. Основы надёжности космических двигательных установок. — М.: МАИ, 1972. — 121 с.

8. ГОСТ Р 9.907-2007. Единая система защиты от коррозии и старения.

9. Латышев Л.А., Молостов-Астафьев В.С., Евдокимов К.В. Методические указания для практических занятий по курсу “Надёжность ЭСУ”. — М.: Изд-во МАИ, 1988. — 36 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

1. МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИССЛЕДОВАНИЯ НАДЕЖНОСТИ СОВРЕМЕННОЙ ТЕХНИКИ	3
1.1. Общие положения	3
1.2. Задачи обеспечения надежности энергосиловых установок космических аппаратов	6
2. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ НАДЕЖНОСТИ	10
2.1. Термины и определения	10
2.2. Процессы механического разрушения	12
2.3. Физико-химические процессы разрушения	14
3. МАТЕМАТИЧЕСКИЙ АППАРАТ ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ	18
3.1. События в теории надежности	18
3.2. Показатели надежности	19
3.3. Надежность элементов	20
4. СТРУКТУРНАЯ НАДЕЖНОСТЬ	24
4.1. Структурные схемы надежности	24
4.2. Надежность невосстанавливаемых систем	27
4.3. Сравнение систем с общим и отдельным резерви- рованием по массе и стоимости	31
5. ОСОБЕННОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ЭНЕРГОСИЛОВЫХ УСТАНОВОК КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ	33
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	35