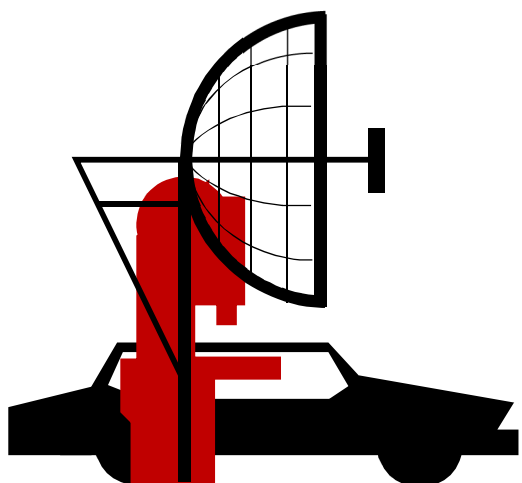


Б иблиотека
И нженера
по **Н** адёжности



Э.В. ДЗИРКАЛ

НАДЁЖНОСТЬ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

**КУРС ЛЕКЦИЙ
(ОПОРНЫЙ КОНСПЕКТ)**

ОГЛАВЛЕНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ	2
1.1. ИСТОРИЯ ВОПРОСА	2
1.2. СПОСОБЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ.....	3
1.3. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ. ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ.....	3
1.4. ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ ВЕРОЯТНОСТИ.....	21
2. ЗАДАНИЕ ТРЕБОВАНИЙ	24
2.1. ВЫБОР НОРМИРУЕМЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ.....	26
2.2. ОБОСНОВАНИЕ ТРЕБУЕМОГО УРОВНЯ НАДЕЖНОСТИ	32
3. РАСЧЕТ НАДЕЖНОСТИ	43
3.1. РАСЧЕТ НАДЕЖНОСТИ НЕВОССТАНАВЛИВАЕМЫХ ИЗДЕЛИЙ ВИДА I.....	43
3.2. РАСЧЕТ НАДЕЖНОСТИ ВОССТАНАВЛИВАЕМЫХ ИЗДЕЛИЙ ВИДА I.....	48
3.3. РАСЧЕТ НАДЕЖНОСТИ ИЗДЕЛИЙ ВИДА II	52
3.4. КОЭФФИЦИЕНТ СОХРАНЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИЗДЕЛИЙ ВИДА I.....	64
3.5. ВЫВОДЫ ПО РАЗДЕЛУ	66
4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ	67
4.1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ	67
4.2. ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДОСТОВЕРНОСТИ ИСХОДНОЙ СТАТИСТИКИ.....	70
4.3. ОПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫЕ ИСПЫТАНИЯ	78
4.4. КОНТРОЛЬНЫЕ ИСПЫТАНИЯ.....	79
4.5. СПЕЦИФИКА РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО МЕТОДА	88
5. СПЕЦИФИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ	90
5.1. ПОСТАНОВКА СПЕЦЗАДАЧ.....	90
5.2. О «НАДЕЖНОСТИ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ»	92
5.3. НАДЕЖНОСТЬ ОПЕРАТОРА ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ.....	94
5.4. НАДЕЖНОСТЬ И БЕЗОПАСНОСТЬ.....	94
6. ЛИТЕРАТУРА	97
ПРИЛОЖЕНИЕ А. РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКТОВ ЗИП	98
A1. ОПРЕДЕЛЕНИЯ. ПОКАЗАТЕЛИ ДОСТАТОЧНОСТИ ЗИП.....	98
A2. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ РАСЧЕТА ЗАПАСОВ В КОМПЛЕКТАХ ЗИП.....	104
A3. МЕТОДИКА РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ	105
A3.1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ.....	105
A3.2. РАСЧЕТ КОМПЛЕКТОВ ЗИП-О	105
A3.3. ОЦЕНКА ЗАПАСОВ В КОМПЛЕКТАХ ЗИП.....	106
A4. ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЗИП ПО НОРМАМ РАСХОДА.....	107
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. ТАБЛИЦЫ	108
B1. ДОВЕРИТЕЛЬНЫЕ ГРАНИЦЫ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ТИПА Т	108
B2. ДОВЕРИТЕЛЬНЫЕ ГРАНИЦЫ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ТИПА Р.....	109
B3. ПЛАНЫ ОДНОСТУПЕНЧАТОГО КОНТРОЛЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ТИПА Т.....	110
B4. ПЛАНЫ ОДНОСТУПЕНЧАТОГО КОНТРОЛЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ТИПА Р.....	111
B5. ПЛАНЫ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО КОНТРОЛЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ТИПА Т	112
B6. ПЛАНЫ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО КОНТРОЛЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ТИПА Р.....	113
B7. ПЛАНЫ ОДНОСТУПЕНЧАТОГО КОНТРОЛЯ K_T	116
B8. ПЛАНЫ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО КОНТРОЛЯ K_T	117

1. ВВЕДЕНИЕ

Надежность - прикладное научное направление, использующее и развивающее методы исследования систем в условиях возникновения и устранения случайных событий - отказов компонентов этих систем. Основные методы исследования и выводы теории надежности носят общий характер и могут применяться в любой области техники. Надежность современных сложных систем имеет свою специфику, связанную с многофункциональностью, с характером возникающих отказов, особенностями процедур восстановления информации, структурной и алгоритмической сложностью.

Курс рассчитан на студентов, не планирующих в будущем специализироваться в области надежности (для последних необходимо более глубокое изучение выбранных направлений по литературе), но имеющих представление об основных понятиях теории надежности и путях решения основных задач надежности, включая:

- задание требований к надежности;
- обеспечение заданного уровня надежности при проектировании, изготовлении и эксплуатации;
- расчёт надежности;
- испытания систем на надежность;
- решение специальных задач, связанных с надежностью (расчёт и оптимизация комплектов запчастей и т.п.).

Студент должен также иметь представление о методах сбора статистики по надежности, получения исходных данных для расчетов, проведения качественного анализа отказов.

В курсе приводятся только формулы, необходимые для пояснения важных зависимостей; отсутствуют вывод формул и почти все формулы, имеющиеся в справочниках. В приложении Б приведены только таблицы, необходимые для решения задач, предлагаемых студентам в процессе обучения.

1.1. ИСТОРИЯ ВОПРОСА

В США:

По известным источникам в 1949 г. около 70% всей морской радиоэлектронной аппаратуры США находилось в состоянии ремонта. В конце второй мировой войны около 60% самолетного оборудования, переброшенного на Дальний Восток, оказалось неисправным, при этом около 50% запасных комплектов и элементов вышли из строя в результате хранения. В тот период радиосвязное оборудование находилось в неработоспособном состоянии 1/7 часть всего времени эксплуатации, радиолокационное — 5/6, гидроакустическое — около 1/2 времени. В США начались ежегодные «симпозиумы по надежности», направление вошло в моду. Появились книги, часть которых была переведена на русский.

В СССР/РФ:

Математическое направление

И. Базовский [Bazovsky, 1961] – перевод с английского;

Д. Ллойд и М. Липов [Lloyd and Lipow, 1962] – перевод с английского;

Гнеденко Б.В., Беляев Ю.К., Соловьев А.Д. (1965) – основополагающая книга по математическим вопросам теории;

И.А. Ушаков - в 1966 г. был опубликован "Краткий справочник по расчету надежности радиоэлектронной аппаратуры" [Козлов и Ушаков, 1966], который был переведен в США [Kozlov and Ushakov, 1970], а затем неоднократно дополнялся и переиздавался в СССР [Козлов и Ушаков, 1975], в обеих Германиях [Kozlov und Uschakov, 1978, 1979], Чехословакии [Usakov, ed., 1989] и США [Ushakov, ed., 1995]. Последний вариант справочника – коллективный труд [10], изданный и в США;

Я.Б.Шор – блестящий пропагандист, автор наиболее популярных работ по надежности.

Физическое направление

А.Я. Резиновский

И.Б. Шубинский

Организаторы

Я.М. Сорин

И.А. Ушаков

Этапы государственного внедрения надежности в практику

— журнал «Надежность и контроль качества» - 1969;

- кабинет надёжности при Политехническом музее – 1969, тексты лекций - брошюры в изд-ве «Знание»;
- «Библиотека инженера по надёжности» в издательстве «Советское Радио»;
- создание отделов надёжности на предприятиях ВПК;
- ряд ГОСТов, устанавливающих обязательность введения требований к надёжности во всю документацию (ТЗ, проекты, ТУ, ПМ и проч.);
- для ВПК – справочники по радиоэлементам (ЦНИИИ-22), включающие зависимость надёжности от режимов применения этих радиоэлементов.

Современное положение. Отдельные заводы продолжают работы по надёжности, прежде всего – испытания.

Организация. Международный технический комитет (ТК-56) - ИСО, МЭК; национальный РФ (ТК-119) - Г.Н.Черкесов, Н.О.Демидович.

Сейчас властями РФ принято решение копировать международные стандарты (ИСО, МЭК). В рамках Таможенного Союза (РФ, Белоруссия, Казахстан) за основу принимаются ГОСТы Казахстана.

Так ГОСТ 27.002 – 89 (термины) был заменён неудачным переводом стандарта ИСО/МЭК, что вызвало взрыв негодования специалистов, ряд статей, писем и т.п. Росстандарт отменил это решение до выхода новой редакции стандарта ИСО/МЭК (примерно в 2015 г) в надежде, что она будет лучше. Это не исключено, хотя наших представителей в ИСО/МЭК всего трое.

На Западе показатели надёжности не используются ни в документации, ни даже в рекламных документах. Испытания не проводятся. Иногда проводятся расчёты по примитивным формулам, сильно завышающим результат. ЗИП определяется на-глаз. Реально надёжность достигается, по-видимому, применением дорогих комплектующих (нержавеющая сталь и т.п.)

1.2. СПОСОБЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ

Перечислим известные способы обеспечения и повышения надёжности технических объектов.

На этапе разработки:

- использование материалов и элементов с улучшенными характеристиками;
- облегчённые рабочие режимы;
 - новые конструктивные решения;
 - резервирование, в том числе аппаратное, временное и информационное;
 - внедрение помехозащищённых, устойчивых программ и кодирования информации;
 - защита от неблагоприятных внешних воздействий;
 - разработка оптимальной стратегии ремонта, техобслуживания и комплекта ЗИП;
 - разработка эффективных методов диагностики, позволяющих снизить требования к квалификации персонала.

На этапе изготовления:

- использование прогрессивной технологии изготовления изделий;
- технологическая тренировка изделий, выявляющая скрытые дефекты;
- испытания на стойкость к внешним воздействиям (температура, влажность, вибрация и др.);

На этапе эксплуатации:

- проведение профилактических (регламентных) работ;
- обеспечение изделий запасными элементами, инструментом и материалами;
- обучение персонала.

На всех этапах: – испытания на надёжность, соответствующие этапу, выявление и ликвидация слабых мест.

1.3. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ. ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Ниже используются термины из ГОСТ 27.002-89 «Надёжность в технике. Основные понятия. Термины и определения», пока ещё действующего (дата введения 01.07.90). Переиздание - июль 2005 г). В данное время готовится новая редакция этого ГОСТа на основе международного стандарта (но новая редакция последнего ещё не готова).

Используемые в курсе термины с определениями приведены в табл. 1.3.1, это фактически текст ГОСТ. Для отдельных стандартизованных терминов приведены в качестве справочных краткие формы,

которые разрешается применять в случаях, исключающих возможность их различного толкования. Приведенные определения разрешено при необходимости изменять, вводя в них производные признаки, раскрывая значение используемых в них терминов, указывая объекты, входящие в объем определяемого понятия. Изменения не должны нарушать объем и содержание понятий, определенных в стандарте. Если в термине содержатся все необходимые и достаточные признаки понятия, определение не приведено, и в графе "Определение" поставлен прочерк. В качестве справочных приведены эквиваленты стандартизованных терминов на английском языке. Стандартизованные термины набраны полужирным шрифтом. К некоторым терминам в таблице приложены пояснения из примечаний к стандарту, а к термину «Надёжность» - примеры неверных, примитивных вариантов. Нумерация пунктов таблицы соответствует ГОСТ.

Таблица 1.3.1

Термин	Определение
<p>1.1. Надёжность</p> <p>Reliability, dependability</p>	<p style="text-align: center;">1. ОБЩИЕ ПОНЯТИЯ</p> <p>Свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования.</p> <p><u>Примечание.</u> Надёжность является комплексным свойством, которое в зависимости от назначения объекта и условий его применения может включать безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость или определенные сочетания этих свойств.</p> <p><i>(сохранять во времени способность к выполнению требуемых функций)</i></p> <p><u>Примеры неверных вариантов:</u> 1. Википедия: «Количественно надёжность оборудования есть величина, обратная интенсивности отказов на заданном интервале времени»</p> <p>2. Часто встречающееся определение: « Вероятность выполнения задачи» (может дополняться разными второстепенными словами, например «в заданное время», «в заданных условиях» и т.п.).</p> <p>3. ГОСТ Р ИСО 9000-2008 (Системы качества): «3.5.3. Собираемый термин, применяемый для описания свойства готовности и влияющих на него свойств безотказности, ремонтпригодности и обеспеченности технического обслуживания и ремонта. ПРИМЕЧАНИЕ – термин «надёжность» применяется только для общего неколичественного описания свойства (МЭК 60050-191:1990)».</p> <p><u>Подчеркнём правильное понимание надёжности – это свойство СОХРАНИТЬ СПОСОБНОСТЬ выполнять работу, но не ВЫПОЛНЯТЬ её. Особенно это различие важно для военной техники.</u></p>

К термину "Надёжность" (п. 1.1)

Терминология по надёжности в технике распространяется на любые технические **объекты** - изделия, сооружения и системы, а также их подсистемы, рассматриваемые с точки зрения надёжности на этапах проектирования, производства, испытаний, эксплуатации и ремонта. В качестве подсистем могут рассматриваться сборочные единицы, детали, компоненты или элементы. При необходимости в понятие "**объект**" могут быть включены информация и ее носители, а также человеческий фактор (например, при рассмотрении надёжности системы "машина-оператор").

Понятие "эксплуатация" включает в себя, помимо применения по назначению, техническое обслуживание, ремонт, хранение и транспортирование.

Термин "объект" может относиться к конкретному объекту, и к одному из представителей, в частности, к наугад выбранному представителю из серии, партии или статистической выборки однотипных объектов.

На стадии разработки термин "объект" применяется к наугад выбранному представителю из генеральной совокупности объектов.

Границ понятия "надежность" не изменяет следующее определение: надежность - свойство объекта сохранять во времени способность к выполнению требуемых функций в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования.

Это определение применяют тогда, когда параметрическое описание нецелесообразно (например, для простейших объектов, работоспособность которых характеризуется по типу "да-нет") или невозможно (например, для систем "машина-оператор", т. е. таких систем, не все свойства которых могут быть характеризованы количественно).

Надежность - комплексное свойство, состоящее в общем случае из безотказности, долговечности, ремонтпригодности и сохраняемости. Например, для неремонтируемых объектов основным свойством может являться безотказность. Для ремонтируемых объектов одним из важнейших свойств, составляющих понятие надежности, может быть ремонтпригодность.

Для объектов, которые являются потенциальным источником опасности, важными понятиями являются "безопасность" и "живучесть". **Безопасность** - свойство объекта при изготовлении и эксплуатации и в случае нарушения работоспособного состояния не создавать угрозу для жизни и здоровья людей, а также для окружающей среды. Хотя безопасность не входит в общее понятие надежности, однако при определенных условиях тесно связана с этим понятием, например, если отказы могут привести к условиям, вредным для людей и окружающей среды сверх предельно допустимых норм.

Понятие "**живучесть**" занимает пограничное место между понятиями "надежность" и "безопасность". Под живучестью понимают свойство объекта, состоящее в его способности противостоять развитию критических отказов из дефектов и повреждений при установленной системе технического обслуживания и ремонта, или свойство объекта сохранять ограниченную работоспособность при воздействиях, не предусмотренных условиями эксплуатации, или свойство объекта сохранять ограниченную работоспособность при наличии дефектов или повреждений определенного вида, а также при отказе некоторых компонентов. Примером служит сохранение несущей способности элементами конструкции при возникновении в них усталостных трещин, размеры которых не превышают заданных значений.

Термин "живучесть" соответствует международному термину fail-safe concept. Для характеристики отказоустойчивости по отношению к человеческим ошибкам в последнее время начали употреблять термин fool-proof concept. В международных документах ИСО, МЭК и ЕОКК сочетание свойств безотказности и ремонтпригодности с учетом системы технического обслуживания и ремонта называют готовностью объекта (availability).

1.2. **Безотказность**

Свойство объекта непрерывно сохранять работоспособное состояние в течение некоторого времени или наработки

Reliability, failure-free operation

К термину "Безотказность" (п. 1.2)

Безотказность в той или иной степени свойственна объекту в любом из возможных режимов его существования. В основном безотказность рассматривается применительно к его использованию по назначению, но во многих случаях необходима оценка безотказности при хранении и транспортировании объекта.

1.3. **Долговечность**

Свойство объекта сохранять работоспособное состояние до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонта

Durability, longevity

К термину "Долговечность" (п. 1.3)

Объект может перейти в предельное состояние, оставаясь работоспособным, если, например, его дальнейшее применение по назначению станет недопустимым по требованиям безопасности, экономичности и эффективности.

1.4. **Ремонтпригодность** Maintainability

Свойство объекта, заключающееся в приспособленности к поддержанию и восстановлению работоспособного состояния путем технического обслуживания и ремонта

К термину "Ремонтпригодность" (п. 1.4)

Термин "ремонтпригодность" эквивалентен международному термину "приспособленность к поддержанию работоспособного состояния" или, короче, "поддерживаемость" (maintainability). Это понятие включает в себя "обслуживаемость", т. е. приспособленность объекта к техническому обслуживанию, "контролепригодность" и приспособленность к предупреждению и обнаружению отказов и повреждений, а также причин их вызывающих. Более общее понятие "поддерживаемость", "эксплуатационная технологичность" (maintenance support, supportability) включает в себя ряд технико-экономических и организационных факторов, например качество подготовки обслуживающего персонала.

Допускается дополнительно к термину "ремонтпригодность" (в узком смысле) применять термины "обслуживаемость", "контролепригодность", "приспособленность к диагностированию", "эксплуатационная технологичность" и др.

1.5. Сохраняемость

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

Storability

К терминам "Сохраняемость" и "Срок сохраняемости" (пп. 1.5; 4.7)

В процессе хранения и транспортирования объекты подвергаются неблагоприятным воздействиям, например колебаниям температуры, действию влажного воздуха, вибрациям и т. п. В результате после хранения и (или) транспортирования объект может оказаться в неработоспособном и даже в предельном состоянии. Сохраняемость объекта характеризуется его способностью противостоять отрицательному влиянию условий и продолжительности его хранения и транспортирования.

В зависимости от условий и режимов применения объекта требования сохраняемости ставят по-разному. Для некоторых классов объектов может быть поставлено требование, чтобы после хранения объект находился в таком же состоянии, что и к моменту начала хранения. В этом случае объект будет удовлетворять требованиям безотказности, долговечности и ремонтпригодности, предъявляемым к объекту к моменту начала хранения. В реальных условиях происходит ухудшение параметров, характеризующих работоспособность объекта, а также снижается его остаточный ресурс. В одних случаях достаточно потребовать, чтобы после хранения и (или) транспортирования объект оставался в работоспособном состоянии. В большинстве других случаев требуется, чтобы объект сохранял достаточный запас работоспособности, т. е. обладал достаточной безотказностью после хранения и (или) транспортирования. В тех случаях, когда предусмотрена специальная подготовка объекта к применению по назначению после хранения и (или) транспортирования, требование о сохранении работоспособности заменяется требованием, чтобы технические параметры объекта, определяющие его безотказность и долговечность, сохранялись в заданных пределах. Очевидно, что все эти случаи охватываются приведенным в стандарте определением понятия сохраняемости.

Требования к показателям безотказности, долговечности и ремонтпригодности для объекта, подвергнутого длительному хранению, должны указываться в техническом задании и в отдельных случаях могут быть снижены относительно уровня заявок на новый объект, не находившийся на хранении.

Следует различать сохраняемость объекта до ввода в эксплуатацию и сохраняемость объекта в период эксплуатации (при перерывах в работе). Во втором случае срок сохраняемости входит составной частью в срок службы.

В зависимости от особенностей и назначения объектов срок сохраняемости до ввода объекта в эксплуатацию может включать в себя срок сохраняемости в упаковке и (или) законсервированном виде, срок монтажа и (или) срок хранения на другом упакованном и (или) законсервированном более сложном объекте.

2. СОСТОЯНИЕ

2.1. Исправное состояние

Состояние объекта, при котором он соответствует всем требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации

Исправность
Good state

2.2. Неисправное состояние

Состояние объекта, при котором он не соответствует хотя бы одному из заявок нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации

Неисправность
Fault, faulty state

<p>2.3. Работоспособное состояние</p> <p><i>Работоспособность</i></p> <p>Up state</p>	<p>Состояние объекта, при котором значения всех параметров, характеризующих способность выполнять заданные функции, соответствуют требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации</p>
<p>2.4. Неработоспособное состояние</p> <p><i>Неработоспособность</i></p> <p>Down state</p>	<p>Состояние объекта, при котором значение хотя бы одного параметра, характеризующего способность выполнять заданные функции, не соответствует требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации.</p>
<p>Примечание. Для сложных объектов возможно деление их неработоспособных состояний. При этом из множества неработоспособных состояний выделяют частично неработоспособные состояния, при которых объект способен частично выполнять требуемые функции</p>	
<p>К терминам "Исправное состояние", "Неисправное состояние", "Работоспособное состояние", "Неработоспособное состояние" (пп. 2.1; 2.2; 2.3; 2.4)</p>	
<p>Данные понятия охватывают основные технические состояния объекта. Каждое из них характеризуется совокупностью значений параметров, описывающих состояние объекта, а также качественных признаков, для которых не применяют количественные оценки. Номенклатуру этих параметров и признаков, а также пределы допустимых их изменений устанавливают в нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации.</p>	
<p>Работоспособный объект в отличие от исправного должен удовлетворять лишь тем требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации, выполнение которых обеспечивает нормальное применение объекта по назначению. Работоспособный объект может быть неисправным, например, если он не удовлетворяет эстетическим требованиям, причем ухудшение внешнего вида объекта не препятствует его применению по назначению.</p>	
<p>Для сложных объектов возможны частично неработоспособные состояния, при которых объект способен выполнять требуемые функции с пониженными показателями или способен выполнять лишь часть требуемых функций.</p>	
<p>Для некоторых объектов признаками неработоспособного состояния, кроме того, могут быть отклонения показателей качества изготавливаемой ими продукции. Например, для некоторых технологических систем к неработоспособному состоянию может быть отнесено такое, при котором значение хотя бы одного параметра качества изготавливаемой продукции не соответствует требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) и технологической документации.</p>	
<p>Переход объекта из одного состояния в другое обычно происходит вследствие повреждения или отказа. Переход объекта из исправного состояния в неисправное работоспособное состояние происходит из-за повреждений.</p>	
<p>В международных документах ИСО, МЭК и ЕОКК [5, 6] введена более детальная классификация состояний. Так, в работоспособном состоянии различают "рабочее состояние" (operating state) и "нерабочее состояние" (nonoperating state), при котором объект не применяется по назначению. "Нерабочее состояние" подразделяют в свою очередь, на состояние дежурства (standby state) и состояние планового простоя (idle, free state). Кроме того, различают "внутренне" неработоспособное состояние (internal disabled state), обусловленное отказом или незавершенностью планового технического обслуживания (ремонта), и внешне неработоспособное состояние (external disabled state), обусловленное организационными причинами. В отраслевой документации допускается использование более детальной классификации состояний, не противоречащей приведенной в настоящем стандарте.</p>	
<p>2.5. Предельное состояние</p> <p>Limiting state</p>	<p>Состояние объекта, при котором его дальнейшая эксплуатация недопустима или нецелесообразна, либо восстановление его работоспособного состояния невозможно или нецелесообразно</p>

<p>2.6. Критерий предельного состояния Limiting state criterion</p>	<p>Признак или совокупность признаков предельного состояния объекта, установленные нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документацией.</p> <p>Примечание. В зависимости от условий эксплуатации для одного и того же объекта могут быть установлены два и более критериев предельного состояния</p>
--------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

К терминам "Предельное состояние" и "Критерий предельного состояния" (пп. 2.5, 2.6)

Переход объекта в предельное состояние влечет за собой временное или окончательное прекращение эксплуатации объекта. При достижении предельного состояния объект должен быть снят с эксплуатации, направлен в средний или капитальный ремонт, списан, уничтожен или передан для применения не по назначению. Если критерий предельного состояния установлен из соображений безопасности хранения и (или) транспортирования объекта, то при наступлении предельного состояния должно быть прекращено хранение и (или) транспортирование объекта. В других случаях при наступлении предельного состояния должно быть прекращено применение объекта по назначению.

Для неремонтируемых объектов имеет место предельное состояние двух видов. Первый вид совпадает с неработоспособным состоянием. Второй вид предельного состояния обусловлен тем обстоятельством, что начиная с некоторого момента времени, дальнейшая эксплуатация еще работоспособного объекта оказывается недопустимой в связи с опасностью или вредностью эксплуатации. Переход неремонтируемого объекта в предельное состояние второго вида происходит раньше потери объектом работоспособности.

Для ремонтируемых объектов выделяют два или более видов предельных состояний. Например, для двух видов предельных состояний требуется отправка объекта в средний или капитальный ремонт, т. е. временное прекращение применения объекта по назначению. Третий вид предельного состояния предполагает окончательное прекращение применения объекта по назначению. Критерии предельного состояния каждого вида устанавливаются документацией.

3. ДЕФЕКТЫ, ПОВРЕЖДЕНИЯ, ОТКАЗЫ

По ГОСТ 15467

<p>3.1. Дефект</p> <p>Defect</p>	<p>(Каждое отдельное несоответствие продукции установленным требованиям)</p>
<p>3.2. Повреждение</p> <p>Damage</p>	<p>Событие, заключающееся в нарушении исправного состояния объекта при сохранении работоспособного состояния</p>
<p>3.3. Отказ</p> <p>Failure</p>	<p>Событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния объекта</p>
<p>3.4. Критерий отказа</p> <p>Failure criterion</p>	<p>Признак или совокупность признаков нарушения работоспособного состояния объекта, установленные в нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации</p>

К терминам "Отказ", "Критерий отказа" (пп. 3.3, 3.4)

Если работоспособность объекта характеризуют совокупностью значений некоторых технических параметров, то признаком возникновения отказа является выход значений любого из этих параметров за пределы допусков. Кроме того, в критерии отказов могут входить также качественные признаки, указывающие на нарушение нормальной работы объекта.

Критерии отказов следует отличать от критериев повреждений. Под критериями повреждений понимают признаки или совокупность признаков неисправного, но работоспособного состояния объекта.

<p>3.7. Критичность отказа</p>	<p>Совокупность признаков, характеризующих последствия отказа.</p>
--------------------------------	--------------------------------------------------------------------

<p>Failure criticality</p>	<p>Примечание. Классификация отказов по критичности (например, по уровню прямых и косвенных потерь, связанных с наступлением отказа, или по</p>
----------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

трудоемкости восстановления после отказа) устанавливается нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документацией по согласованию с заказчиком на основании технико-экономических соображений и соображений безопасности

К термину "Критичность отказа" (п. 3.7)

Понятие критичности отказа введено для того, чтобы проводить классификацию отказов по их последствиям. Подобная классификация содержится в международных документах ИСО, МЭК и ЕОКК, а также в некоторых отраслевых отечественных документах. Критерием для классификации могут служить прямые и косвенные потери, вызванные отказами, затраты труда и времени на устранение последствий отказов, возможность и целесообразность ремонта силами потребителя или необходимость ремонта изготовителем или третьей стороной, продолжительность простоев из-за возникновения отказов, степень снижения производительности при отказе, приводящем к частично неработоспособному состоянию, и т. п. Для простых объектов эта классификация не используется.

При классификации отказов по последствиям могут быть введены две, три и большее число категорий отказов. В международных документах ИСО, МЭК, ЕОКК различают критические (critical) и некритические (non-critical). Последние подразделяют на существенные (major) и несущественные (minor) отказы. Границы между категориями отказов достаточно условны.

Отказ одного и того же объекта может трактоваться как критический, существенный или несущественный в зависимости от того, рассматривается объект как таковой или он является составной частью другого объекта. Несущественный отказ объекта, входящего в состав более ответственного объекта, может рассматриваться как существенный и даже критический в зависимости от последствий отказа сложного объекта. Для проведения классификации отказов по последствиям необходим анализ критериев, причин и последствий отказов и построение логической и функциональной связи между отказами.

3.8. Ресурсный отказ Marginal failure	Отказ, в результате которого объект достигает предельного состояния
3.9. Независимый отказ Primary failure	Отказ, не обусловленный другими отказами
3.10. Зависимый отказ Secondary failure	Отказ, обусловленный другими отказами
3.11. Внезапный отказ Sudden failure	Отказ, характеризующийся скачкообразным изменением значений одного или нескольких параметров объекта
3.12. Постепенный отказ Gradual failure	Отказ, возникающий в результате постепенного изменения значений одного или нескольких параметров объекта

К терминам "Внезапный отказ" и "Постепенный отказ" (пп. 3.11, 3.12)

Эти термины позволяют разделять отказы на две категории в зависимости от возможности прогнозировать момент наступления отказа. В отличие от внезапного отказа, наступлению постепенного отказа предшествует непрерывное и монотонное изменение одного или нескольких параметров, характеризующих способность объекта выполнять заданные функции. Ввиду этого удастся предупредить наступление отказа или принять меры по устранению (локализации) его нежелательных последствий.

Четкой границы между внезапными и постепенными отказами, однако, провести не удастся. Механические, физические и химические процессы, которые составляют причины отказов, как правило, протекают во времени достаточно медленно. Так, усталостная трещина в стенке трубопровода или сосуда давления, зародившаяся из трещинообразного дефекта, медленно растет в процессе эксплуатации; этот рост в принципе может быть прослежен средствами неразрушающего контроля. Однако собственно отказ (наступление течи) происходит внезапно. Если по каким-либо причинам своевременное обнаружение трещины оказалось невозможным, то отказ придется признать внезапным.

По мере совершенствования расчетных методов и средств контрольно-измерительной техники, позволяющих своевременно обнаруживать источники возможных отказов и прогнозировать их развитие во времени, все большее число отказов будет относиться к категории постепенных.

Известно следующее определение внезапного отказа: это отказ, наступление которого не может быть предсказано предварительным контролем или диагностированием.

3.13. Сбой

Самоустраняющийся отказ или однократный отказ, устраняемый незначительным вмешательством оператора

Interruption

К термину "Сбой" (п. 3.13)

Отличительным признаком сбоя является то, что восстановление работоспособного состояния объекта может быть обеспечено без ремонта, например, путем воздействия оператора на органы управления, устранением обрыва нити, магнитной ленты и т. п., коррекцией положения заготовки.

Характерным примером сбоя служит остановка ЭВМ, устраняемая повторным пуском программы с места останова или ее перезапуском сначала.

3.14. Перемежающийся отказ

Многократно возникающий самоустраняющийся отказ одного и того же характера

Intermittent failure

3.15. Явный отказ

Отказ, обнаруживаемый визуально или штатными методами и средствами контроля и диагностирования при подготовке объекта к применению или в процессе его применения по назначению

Explicit failure

3.16. Скрытый отказ

Отказ, не обнаруживаемый визуально или штатными методами и средствами контроля и диагностирования, но выявляемый при проведении технического обслуживания или специальными методами диагностики

Latent failure

3.17. Конструктивный отказ

Отказ, возникший по причине, связанной с несовершенством или нарушением установленных правил и (или) норм проектирования и конструирования

Design failure

3.18. Производственный отказ

Отказ, возникший по причине, связанной с несовершенством или нарушением установленного процесса изготовления или ремонта, выполняемого на ремонтном предприятии

Manufacturing failure

3.19. Эксплуатационный отказ

Отказ, возникший по причине, связанной с нарушением установленных правил и (или) условий эксплуатации

Misuse failure, mishandling failure

К терминам "Конструктивный отказ", "Производственный отказ", "Эксплуатационный отказ" (пп. 3.17, 3.18, 3.19)

Классификация отказов по причинам возникновения введена с целью установления, на какой стадии создания или существования объекта следует провести мероприятия для устранения причин отказов.

Допускается выделять отказы комплектующих изделий, изготавливаемых не на том предприятии, где производится объект в целом. Отказы комплектующих элементов также могут быть конструктивными, производственными и эксплуатационными. Классификация не является исчерпывающей, поскольку возможно возникновение отказов, вызванных двумя или тремя причинами.

3.20. Деградиционный отказ

Отказ, обусловленный естественными процессами старения, изнашивания, коррозии и усталости при соблюдении всех установленных правил и (или) норм проектирования, изготовления в эксплуатации

Wear-out failure,
ageing failure

К термину "Деградационный отказ" (п. 3.20)

При анализе надежности различают ранние отказы, когда проявляется влияние дефектов, не обнаруженных в процессе изготовления, испытаний и (или) приемочного контроля, и поздние, деградационные отказы. Последние происходят на заключительной стадии эксплуатации объекта, когда вследствие естественных процессов старения, изнашивания и т. п. объект или его составные части приближаются к предельному состоянию по условиям физического износа.

4. ВРЕМЕННЫЕ ПОНЯТИЯ

4.1. Нарботка

Продолжительность или объем работы объекта.

Operating time

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

К термину "Нарботка" (п. 4.1)

Нарботку объекта, работающего непрерывно, можно измерять в единицах календарного времени. Если объект работает с перерывами, то различают непрерывную и суммарную наработку. В этом случае наработку также можно измерять в единицах времени. Для многих объектов физическое изнашивание связано не только с календарной продолжительностью эксплуатации, но и с объемом работы объекта, и поэтому зависит от интенсивности применения объекта по назначению. Для таких объектов наработку обычно выражают через объем произведенной работы или число рабочих циклов.

4.2. Нарботка до отказа

Нарботка объекта от начала эксплуатации до возникновения первого отказа

Operating time to failure

4.3. Нарботка между отказами

Нарботка объекта от окончания восстановления его работоспособного состояния после отказа до возникновения следующего отказа

Operating time between failures

4.4. Время восстановления

Продолжительность восстановления работоспособного состояния объекта

Restoration time

4.5. Ресурс

Суммарная наработка объекта от начала его эксплуатации или ее возобновления после ремонта до перехода в предельное состояние

Useful life, life

4.6. Срок службы

Календарная продолжительность эксплуатации от начала эксплуатации объекта или ее возобновления после ремонта до перехода в предельное состояние

Useful lifetime, lifetime

4.7. Срок сохраняемости

Календарная продолжительность хранения и (или) транспортирования объекта, в течение которой сохраняются в заданных пределах значения параметров, характеризующих способность объекта выполнять заданные функции.

Storability time, shelf life

Примечание. По истечении срока сохраняемости объект должен соответствовать требованиям безотказности, долговечности и ремонтпригодности, установленным нормативно-технической документацией на объект

К терминам "Нарботка до отказа", "Нарботка между отказами", "Время восстановления", "Ресурс", "Срок службы", "Срок сохраняемости" (п. 4.2-4.7)

Наработка индивидуального объекта до первого отказа, его наработка между отказами, ресурс и т. п. могут быть определены лишь после того, как наступил отказ или было достигнуто предельное состояние. Пока эти события не наступили, можно говорить лишь о прогнозировании этих величин с большей или меньшей достоверностью.

Наработка до отказа вводится как для неремонтируемых (невосстанавливаемых), так и для ремонтируемых (восстанавливаемых) объектов. Наработка между отказами определяется объемом работы объекта от k -го до $(k+1)$ -го отказа, где $k = 1, 2, \dots$. Эта наработка относится только к восстанавливаемым объектам.

Технический ресурс представляет запас возможной наработки объекта. Для неремонтируемых объектов он совпадает с продолжительностью пребывания в работоспособном состоянии в режиме применения по назначению, если переход в предельное состояние обусловлен только возникновением отказа.

Поскольку средний и капитальный ремонт позволяют частично или полностью восстанавливать ресурс, то отсчет наработки при исчислении ресурса возобновляют по окончании такого ремонта, различая в связи с этим **доремонтный, межремонтный, послеремонтный и полный** (до списания) ресурс.

Доремонтный ресурс исчисляют до первого среднего (капитального) ремонта. Число возможных видов межремонтного ресурса зависит от чередования капитальных и средних ремонтов. Послеремонтный ресурс отсчитывают от последнего среднего (капитального) ремонта.

Полный ресурс отсчитывают от начала эксплуатации объекта до его перехода в предельное состояние, соответствующее окончательному прекращению эксплуатации.

Аналогичным образом выделяют виды срока службы и срока сохраняемости. При этом срок службы и срок сохраняемости измеряют в единицах времени. Соотношение значений ресурса и срока службы зависит от интенсивности использования объекта. Полный срок службы, как правило, включает продолжительности всех видов ремонта.

4.9. Назначенный ресурс

Суммарная наработка, при достижении которой эксплуатация объекта должна быть прекращена независимо от его технического состояния

Assigned operating time

4.10. Назначенный срок службы

Календарная продолжительность эксплуатации, при достижении которой эксплуатация объекта должна быть прекращена независимо от его технического состояния

Assigned lifetime

4.11. Назначенный срок хранения

Календарная продолжительность хранения, при достижении которой хранение объекта должно быть прекращено независимо от его технического состояния.

Assigned storage time

Примечание к терминам 4.9-4.11. По истечении назначенного ресурса (срока службы, срока хранения) объект должен быть изъят из эксплуатации и должно быть принято решение, предусмотренное соответствующей нормативно-технической документацией - направление в ремонт, списание, уничтожение, проверка и установление нового назначенного срока и т. д.

К терминам "Назначенный срок службы", "Назначенный ресурс", "Назначенный срок хранения" (пп. 4.10; 4.9; 4.11)

Цель установления назначенного срока службы и назначенного ресурса - обеспечить принудительное заблаговременное прекращение применения объекта по назначению, исходя из заявок безопасности или технико-экономических соображений. Для объектов, подлежащих длительному хранению, может быть установлен назначенный срок хранения, по истечении которого дальнейшее хранение недопустимо, например, из заявок безопасности.

При достижении объектом назначенного ресурса (назначенного срока службы, назначенного срока хранения) и в зависимости от назначения объекта, особенности эксплуатации, технического состояния и других факторов объект может быть списан, направлен в средний или капитальный ремонт, передан для применения не по назначению, переконсервирован (при хранении) или может быть принято решение о продолжении эксплуатации.

Назначенный срок службы и назначенный ресурс являются технико-эксплуатационными характеристиками и не относятся к показателям надежности (показателям долговечности). Однако при установлении назначенного срока службы и назначенного ресурса принимают во внимание прогнозируемые (или достигнутые) значения показателей и надежности. Если установлено требование безопасности, то назначенный срок службы (ресурс) должен соответствовать значениям вероятности безотказной работы по отношению к критическим отказам, близким к единице. Из соображений безопасности может быть также введен коэффициент запаса по времени.

5. ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ И РЕМОНТ

По ГОСТ 18322

5.1. Техническое обслуживание

Maintenance

(комплекс операций или операция по поддержанию работоспособности или исправности изделия при использовании по назначению, ожидании, хранении и транспортировании)

5.2. Восстановление

Процесс перевода объекта в работоспособное состояние из неработоспособного состояния

Restoration,
recovery

5.3. Ремонт

По ГОСТ 18322

Repair

(комплекс операций по восстановлению исправности или работоспособности изделий и восстановлению ресурсов изделий или их составных частей)

К терминам "Техническое обслуживание", "Восстановление", "Ремонт" (пп. 5.1; 5.2; 5.3)

Техническое обслуживание включает регламентированные в конструкторской (проектной) и (или) эксплуатационной документации операции по поддержанию работоспособного и исправного состояния. В техническое обслуживание входят контроль технического состояния, смазывание и т. п.

Восстановление включает в себя идентификацию отказа (определение его места и характера), наладку или замену отказавшего элемента, регулирование и контроль технического состояния элементов объекта и заключительную операцию контроля работоспособности объекта в целом.

Перевод объекта из предельного состояния в работоспособное состояние осуществляется при помощи **ремонта**, при котором происходит восстановление ресурса объекта в целом. В ремонт могут входить разборка, дефектовка, замена или восстановление отдельных блоков, деталей и сборочных единиц, сборка и т. д. Содержание отдельных операций ремонта может совпадать с содержанием операций технического обслуживания.

5.4. Обслуживаемый объект

Объект, для которого проведение технического обслуживания предусмотрено нормативно-технической документацией и (или) конструкторской (проектной) документацией

Maintainable item

5.5. Необслуживаемый объект

Объект, для которого проведение технического обслуживания не предусмотрено нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документацией

Nonmaintainable
item

5.6. Восстанавливаемый объект

Объект, для которого в рассматриваемой ситуации проведение восстановления работоспособного состояния предусмотрено в нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации

Restorable item

5.7. Невосстанавливаемый объект

Объект, для которого в рассматриваемой ситуации проведение восстановления работоспособного состояния не предусмотрено в нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации

Nonrestorable
item

5.8. **Ремонтируемый объект**

Объект, ремонт которого возможен и предусмотрен нормативно-технической, ремонтной и (или) конструкторской (проектной) документацией

Repairable item

5.9. **Неремонтируемый объект**

Объект, ремонт которого не возможен или не предусмотрен нормативно-технической, ремонтной и (или) конструкторской (проектной) документацией

Nonrepairable item

К терминам "Обслуживаемый объект", "Необслуживаемый объект", "Ремонтируемый объект", "Неремонтируемый объект", "Восстанавливаемый объект", "Невосстанавливаемый объект" (пп. 5.4; 5.5; 5.8; 5.9)

При разработке объекта предусматривают выполнение (или невыполнение) технического обслуживания объектов на протяжении срока их службы, т. е. объекты делят на технически обслуживаемые и технически необслуживаемые. При этом некоторые неремонтируемые объекты являются технически обслуживаемыми.

Объект может быть технически ремонтируемым, но не восстанавливаемым в конкретной ситуации.

6. ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ

6.2. **Единичный показатель надежности**

Показатель надежности, характеризующий одно из свойств, составляющих надежность объекта

Simple reliability measure

6.3. **Комплексный показатель надежности**

Показатель надежности, характеризующий несколько свойств, составляющих надежность объекта

Integrated reliability measure

К терминам "Единичный показатель надежности" и "Комплексный показатель надежности" (пп. 6.2; 6.3)

В отличие от единичного показателя надежности комплексный показатель надежности количественно характеризует не менее двух свойств, составляющих надежность, например безотказность и ремонтпригодность. Примером комплексного показателя надежности служит коэффициент готовности (п. 6.26) K_G , стационарное значение которого (если оно существует) определяют по формуле

6.26) K_G , стационарное значение которого (если оно существует) определяют по формуле

$$K_G = \frac{T}{T + T_B}$$

где T - средняя наработка на отказ (п. 6.11); T_B - среднее время восстановления (п. 6.21).

ПОКАЗАТЕЛИ БЕЗОТКАЗНОСТИ

6.8. **Вероятность безотказной работы**
Reliability function

Вероятность того, что в пределах заданной наработки отказ объекта не возникнет

$P(t)$

К термину "Вероятность безотказной работы" (п. 6.8)

Вероятность безотказной работы определяется в предположении, что в начальный момент времени (момент начала исчисления наработки) объект находился в работоспособном состоянии.

6.10 **Средняя наработка до отказа**

Mean operating time to failure

Математическое ожидание наработки объекта до первого отказа

T_o

6.11. **Средняя наработка на отказ**

Нарработка на отказ

Отношение суммарной наработки восстанавливаемого объекта к математическому ожиданию числа его отказов в течение этой наработки

T_o

Mean operating time between failures

К термину "Средняя наработка на отказ" (п. 6.11)

Этот показатель введен применительно к восстанавливаемым объектам, при эксплуатации которых допускаются многократно повторяющиеся отказы. На оси времени моменты отказов образуют поток отказов, а моменты восстановлений - поток восстановлений.

6.12. **Интенсивность отказов**

Failure rate

Условная плотность вероятности возникновения отказа объекта, определяемая при условии, что до рассматриваемого момента времени отказ не возник

λ

6.13. **Параметр потока отказов**

Failure intensity

Отношение математического ожидания числа отказов восстанавливаемого объекта за достаточно малую его наработку к значению этой наработки

λ

6.14. **Осредненный параметр потока отказов**

Mean failure intensity

Отношение математического ожидания числа отказов восстанавливаемого объекта за конечную наработку к значению этой наработки.

Примечание к терминам 6.8-6.14. Все показатели безотказности (как приводимые ниже другие показатели надежности) определены как вероятностные характеристики. Их статистические аналоги определяют методами математической статистики

К терминам "Параметр потока отказов" и "Осредненный параметр потока отказов" (пп. 6.13; 6.14)

Параметр потока отказов $\mu(t)$ определяют по формуле

$$\mu(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{M \{r(t + \Delta t) - r(t)\}}{\Delta t} \quad (12)$$

где Δt - малый отрезок наработки,

$r(t)$ - число отказов, наступивших от начального момента времени до достижения наработки t .

Разность $r(t+\Delta t) - r(t)$ представляет собой число отказов на отрезке Δt .

Наряду с параметром потока отказов в расчетах и обработке экспериментальных данных часто используют осредненный параметр потока отказов

$$\bar{\mu}(t) = \frac{M \{r(t_2) - r(t_1)\}}{t_2 - t_1} \quad (13)$$

По сравнению с формулой (12) здесь рассматривается число отказов за конечный отрезок $[t_1, t_2]$, причем $t_1 \leq t \leq t_2$. Если поток отказов стационарный, то параметры, определяемые по формулам (12) и (13), от t не зависят.

ПОКАЗАТЕЛИ ДОЛГОВЕЧНОСТИ

6.15. **Гамма-процентный ресурс**

Суммарная наработка, в течение которой объект не достигнет предельного состояния с вероятностью γ , выраженной в процентах

<p>Gamma-percentile life 6.16. Средний ресурс</p>	<p>Математическое ожидание ресурса T_p</p>
<p>Mean life, mean useful life 6.17. Гамма-процентный срок службы</p>	<p>Календарная продолжительность эксплуатации, в течение которой объект не достигнет предельного состояния с вероятностью γ, выраженной в процентах</p>
<p>Gamma-percentile lifetime 6.18. Средний срок службы</p> <p>Mean lifetime</p>	<p>Математическое ожидание срока службы $T_{сл}$</p> <p>Примечание к терминам 6.15-6.18. При использовании показателей долговечности следует указывать начало отсчета и вид действий после наступления предельного состояния (например, гамма-процентный ресурс от второго капитального ремонта до списания). Показатели долговечности, отсчитываемые от ввода объекта в эксплуатацию до окончательного снятия с эксплуатации, называются гамма-процентный полный ресурс (срок службы), средний полный ресурс (срок службы)</p>
<p>6.21. Среднее время восстановления</p>	<p>ПОКАЗАТЕЛИ РЕМОНТОПРИГОДНОСТИ Математическое ожидание времени восстановления работоспособного состояния объекта после отказа T_v</p>
<p>Mean restoration time 6.22. Интенсивность восстановления</p> <p>(Instantaneous) restoration rate</p>	<p>Условная плотность вероятности восстановления работоспособного состояния объекта, определенная для рассматриваемого момента времени при условии, что до этого момента восстановление не было завершено</p> <p>μ</p>
<p>6.24. Гамма-процентный срок сохраняемости</p>	<p>ПОКАЗАТЕЛИ СОХРАНЯЕМОСТИ Срок сохраняемости, достигаемый объектом с заданной вероятностью γ, выраженной в процентах</p>
<p>Gamma-percentile storage time 6.25. Средний срок сохраняемости</p> <p>Mean storage time</p>	<p>Математическое ожидание срока сохраняемости $T_{хр}$</p>
<p>6.26. Коэффициент готовности</p> <p>(Instantaneous) availability function</p>	<p>КОМПЛЕКСНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ Вероятность того, что объект окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени, кроме планируемых периодов, в течение которых применение объекта по назначению не предусматривается</p> <p>$K_2 = T_0 / (T_0 + T_v)$</p>
<p>6.27. Коэффициент оперативной готовности</p>	<p>Вероятность того, что объект окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени, кроме планируемых периодов, в течение которых применение объекта по назначению не предусматривается, и, начиная с этого момента, будет работать безотказно в течение заданного интервала времени $K_{ог}$</p>

<p>Operational availability function 6.28. Коэффициент технического использования</p>	<p>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</p>
<p>Steady state availability factor 6.29. Коэффициент сохранения эффективности</p>	<p>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</p>
<p>Efficiency ratio</p>	<p><i>К_{тп}</i> <i>Кэф</i></p>
<p>К терминам "Коэффициент готовности", "Коэффициент оперативной готовности", "Коэффициент технического использования", "Коэффициент сохранения эффективности" (п. 6.26; 6.27; 6.28; 6.29)</p>	
<p>Коэффициент готовности характеризует готовность объекта к применению по назначению только в отношении его работоспособности в произвольный момент времени. Коэффициент оперативной готовности характеризует надежность объекта, необходимость применения которого возникает в произвольный момент времени, после которого ещё требуется безотказная работа в течение заданного интервала времени. Различают стационарный и нестационарный коэффициенты готовности, а также средний коэффициент готовности.</p>	
<p>Коэффициент технического использования характеризует долю времени нахождения объекта в работоспособном состоянии относительно общей продолжительности эксплуатации. Коэффициент сохранения эффективности характеризует степень влияния отказов на эффективность его применения по назначению. Для каждого конкретного типа объектов содержание понятия эффективности и точный смысл показателя эффективности задаются техническим заданием и вводятся в нормативно-техническую и (или) конструкторскую (проектную) документацию.</p>	
<p align="center">7. РЕЗЕРВИРОВАНИЕ</p>	
<p>7.1. Резервирование</p>	<p>Способ обеспечения надежности объекта за счет использования дополнительных средств и (или) возможностей, избыточных по отношению к минимально необходимым для выполнения требуемых функций</p>
<p>Redundancy</p>	
<p>К термину "Резервирование" (п. 7.1)</p>	
<p>Наряду с резервированием путем введения дополнительных (резервных) элементов находят широкое применение другие виды резервирования. Среди них временное резервирование (с использованием резервов времени), информационное резервирование (с использованием резервов информации), функциональное резервирование, при котором используется способность элементов выполнять дополнительные функции или способность объекта перераспределять функции между элементами, нагрузочное резервирование, при котором используется способность элементов воспринимать дополнительные нагрузки сверх номинальных, а также способность объекта перераспределять нагрузки между элементами.</p>	
<p>7.2. Резерв</p>	<p>Совокупность дополнительных средств и (или) возможностей, используемых для резервирования</p>
<p>Reserve 7.3. Основной элемент</p>	<p>Элемент объекта, необходимый для выполнения требуемых функций без использования резерва</p>
<p>Major element 7.4. Резервируемый элемент</p>	<p>Основной элемент, на случай отказа которого в объекте предусмотрены один или несколько резервных элементов</p>
<p>Element under redundancy 7.5. Резервный элемент</p>	<p>Элемент, предназначенный для выполнения функции основного элемента в случае отказа последнего</p>

Redundant element	
7.6. Кратность резерва	Отношение числа резервных элементов к числу резервируемых ими элементов, выраженное несокращенной дробью
Redundancy ratio	
7.7. Дублирование	Резервирование с кратностью резерва один к одному
Duplication	
7.8. Нагруженный резерв	Резерв, который содержит один или несколько резервных элементов, находящихся в режиме основного элемента
Active reserve, loaded reserve	
7.9. Облегченный резерв	Резерв, который содержит один или несколько резервных элементов, находящихся в менее нагруженном режиме, чем основной элемент
Reduced reserve	
7.10. Ненагруженный резерв	Резерв, который содержит один или несколько резервных элементов, находящихся в ненагруженном режиме до начала выполнения ими функций основного элемента
Standby reserve, unloaded reserve	
7.11. Общее резервирование	Резервирование, при котором резервируется объект в целом
Whole system redundancy	
7.12. Раздельное резервирование	Резервирование, при котором резервируются отдельные элементы объекта или их группы
Segregated redundancy	
7.13. Постоянное резервирование	Резервирование, при котором используется нагруженный резерв и при отказе любого элемента в резервированной группе выполнение объектом требуемых функций обеспечивается оставшимися элементами без переключений
Continuous redundancy	
7.14. Резервирование замещением	Резервирование, при котором функции основного элемента передаются резервному только после отказа основного элемента
Standby redundancy	
7.15. Скользящее резервирование	Резервирование замещением, при котором группа основных элементов резервируется одним или несколькими резервными элементами, каждый из которых может заменить любой из отказавших элементов данной группы
Sliding redundancy	
7.17. Резервирование с восстановлением	Резервирование, при котором восстановление отказавших основных и (или) резервных элементов технически возможно без нарушения работоспособности объекта в целом и предусмотрено эксплуатационной документацией
Redundancy with restoration	
7.18. Резервирование без восстановления	Резервирование, при котором восстановление отказавших основных и (или) резервных элементов технически невозможно без нарушения работоспособности объекта в целом и (или) не предусмотрено эксплуатационной документацией
Redundancy without restoration	
7.19. Вероятность успешного перехода на резерв	Вероятность того, что переход на резерв произойдет без отказа объекта, т. е. произойдет за время, не превышающее допустимого значения перерыва в функционировании и (или) без снижения качества функционирования
Probability of successful redundancy	

10. ИСПЫТАНИЯ НА НАДЕЖНОСТЬ

10.1. Испытания на надежность

Reliability test

По ГОСТ 16504

(испытания, проводимые для определения показателей надёжности в заданных условиях)

Примечание. В зависимости от исследуемого свойства различают испытания на безотказность, ремонтпригодность, сохраняемость и долговечность (ресурсные испытания)

К термину "Испытания на надежность" (п. 10.1)

Испытания на надежность относятся к числу важнейших составных частей работы по обеспечению и повышению надежности технических объектов. Эти испытания в зависимости от контролируемых (оцениваемых) свойств, составляющих надежность, могут состоять из испытаний на безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость. В частности, ресурсные испытания относятся к испытаниям на долговечность.

10.2. Определительные испытания на надежность

Determination test

Испытания, проводимые для определения показателей надежности с заданными точностью и достоверностью

10.3. Контрольные испытания на надежность

Compliance test

Испытания, проводимые для контроля показателей надежности

Немного о жизненном цикле изделия. Этапы жизненного цикла обычно таковы:

- разработка и согласование технического задания (ТЗ);
- эскизное/техническое проектирование;
- рабочее проектирование. Разработка документации для изготовления (в т.ч. ТУ) и для эксплуатации (в т.ч. РЭ/ИЭ/РП...);
- изготовление опытных образцов (ОО), приёмочные испытания ОО;
- серийное производство, приёмо-сдаточные, периодические, типовые испытания (ПСИ, ПИ, ТИ);
- транспортировка к месту эксплуатации, монтаж на месте;
- ввод в эксплуатацию;
- эксплуатация (работа, хранение и транспортирование; ТО, текущий, средний, капитальный ремонт);
- прекращение эксплуатации, списание, утилизация.

Типовая структура современного производственного предприятия приведена на рис. 1.3.1.

Структура разных предприятий может отличаться от данной схемы, т.е. функции одних подразделений могут выполняться другими. Однако сами функции необходимы (по крайней мере, для машиностроительных заводов).

Схема управления предприятием

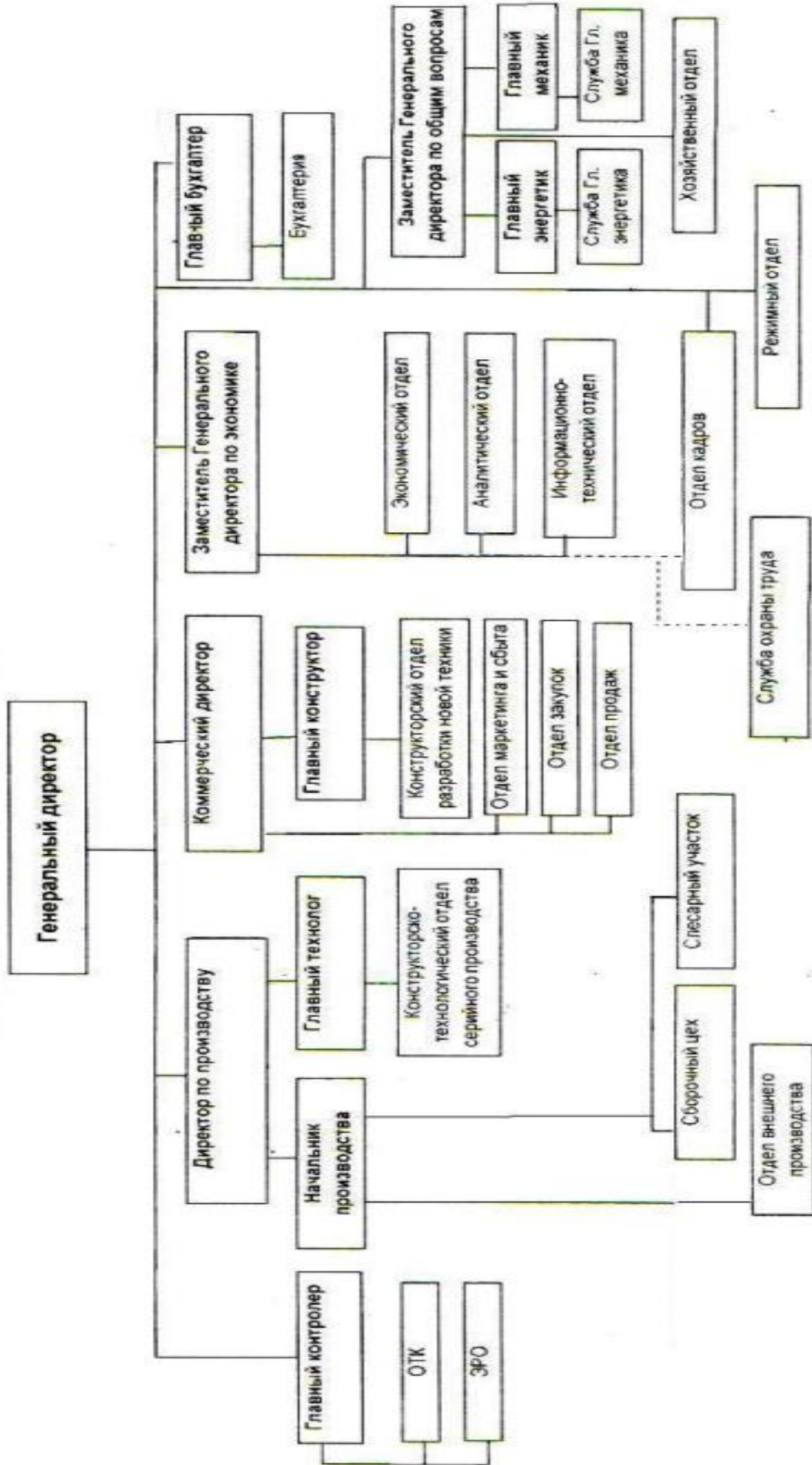


Рисунок 1.3.1

1.4. ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ ВЕРОЯТНОСТИ

В курсе используются следующие положения теории вероятностей (обозначим вероятности событий A и B как $P(A)$, $P(B)$):

Для независимых событий: $P(A \text{ и } B) = P(A)P(B)$, $P(A \text{ или } B) = P(A) + P(B)$;

Для зависимых событий: $P(A \text{ и } B) = P(A)P(B/A)$.

Законы распределения случайных величин

Плотность распределения обозначим $f(x)$. Это вероятность того, что непрерывная случайная величина примет значение x . Вероятность того, что непрерывная случайная величина x примет значение, принадлежащее интервалу (a, b) , равна определенному интегралу от $f(x)$, взятому в пределах от a до b . На рис. 1.4.1 – 1.4.3 показаны графики $f(x)$ для трёх видов распределений.

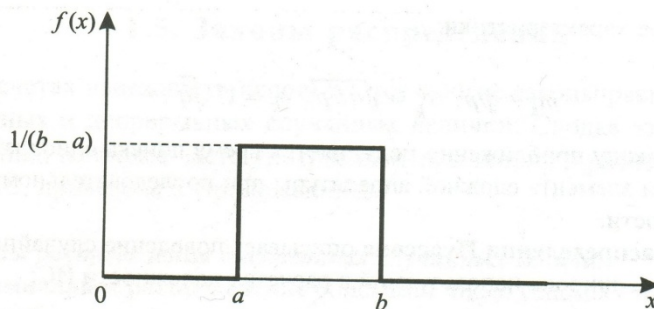


Рис. 1.4.1. Равномерное распределение

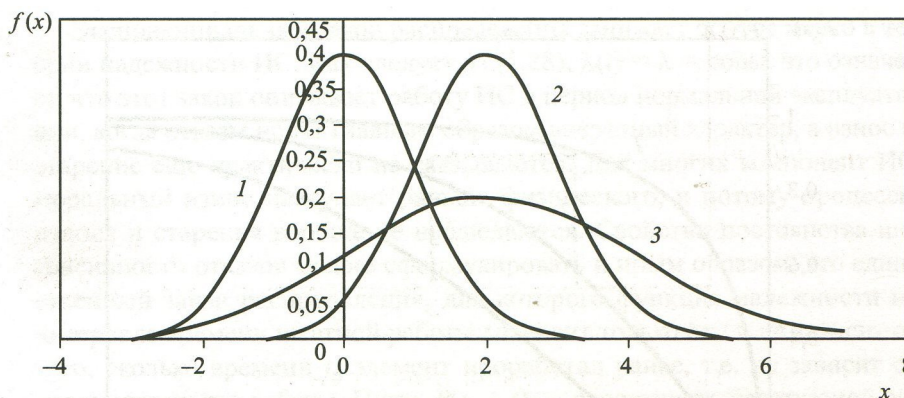


Рис. 1.4.2. Нормальное распределение (кривая 1: $m_x = 0$, $\sigma = 1$; кривая 2: $m_x = 2$, $\sigma = 1$; кривая 3: $m_x = 2$, $\sigma = 2$; m_x – медиана распределения, σ – среднеквадратическое отклонение)

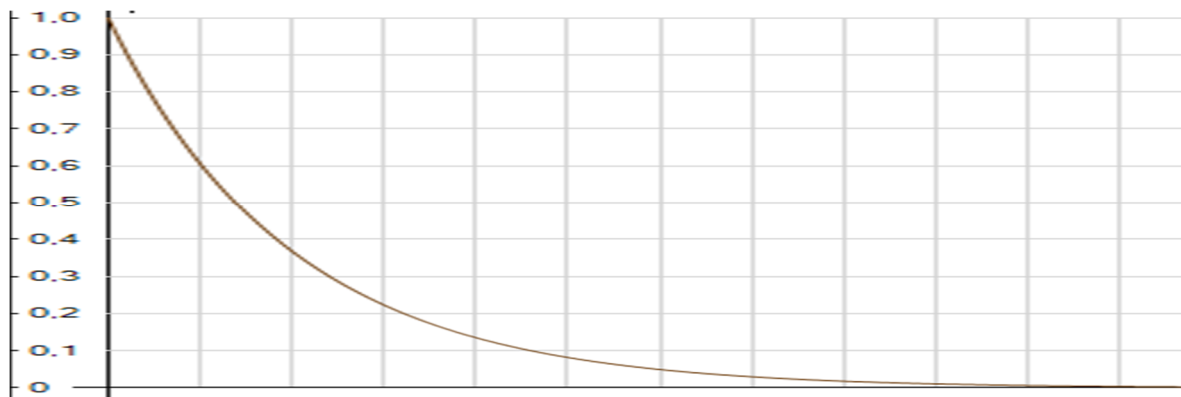


Рис. 1.4.3. Экспоненциальное распределение $P(t) = \exp(-\lambda t)$, $f(x) = \lambda e^{-\lambda x} = \lambda \exp(-\lambda x)$

Типовой «жизненный цикл» технического изделия. В этом цикле обычно имеют место три стадии: период «детской смертности» (приработка, 1-й участок); период нормальной работы (λ постоянна, 2-й участок); период старения (3-й участок), рис. 1.4.4.

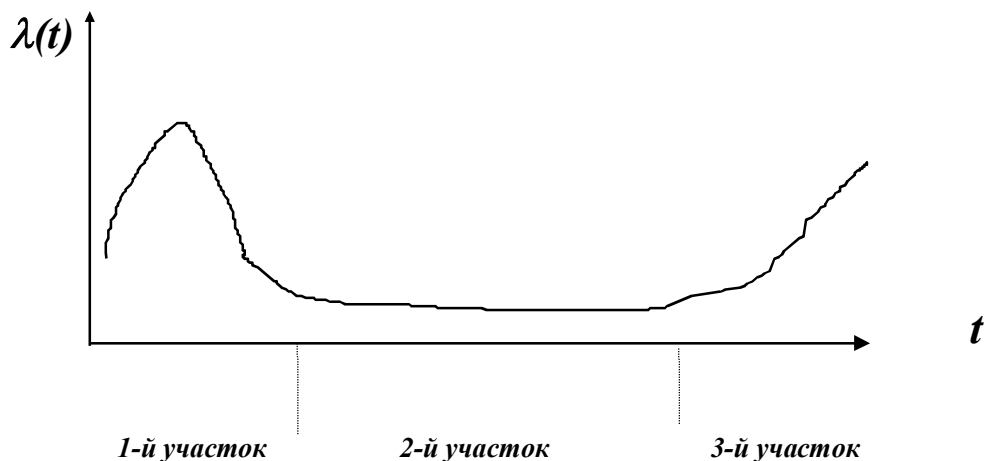


Рис. 1.4.4. Изменение во времени интенсивности отказов $\lambda(t)$

Потоки случайных событий «отказ + восстановление»

Пуассоновский поток: ординарный, без последействия

Определение: Поток событий называется **ординарным**, если вероятность появления двух или более событий на элементарном интервале времени Δt есть величина бесконечно малая по сравнению с вероятностью появления одного события на этом интервале, т.е.

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} P(n, \Delta t) = 0 \quad \text{при } n = 2, 3, \dots$$

Определение: Поток событий называется **поток без последействия**, если для любых непересекающихся интервалов времени число событий, попадающих на один из них, не зависит от числа событий, попадающих на другой.

Определение: Поток называется **стационарным**, если вероятность появления n событий на интервале времени Δt не зависит от его расположения на временной оси t . Стационарность потока означает, что его вероятностные характеристики не зависят от времени.

Пуассоновский стационарный поток называют «простейшим». Для него число n событий, попадающих на любой интервал Δt , распределено по закону Пуассона:

$$P(n, \Delta t) = (\lambda \Delta t)^n e^{-\lambda \Delta t} / n!$$

Здесь параметр λ - это плотность потока отказов.

Вероятность того, что на интервале времени Δt не появится ни одного события, равна:

$$P(0, \Delta t) = e^{-\lambda \Delta t} .$$

При этом $M(T) = 1/\lambda$.

Если число отказов на интервале подчиняется закону Пуассона, то время между отказами распределено по экспоненциальному закону, и наоборот.

Схема «гибели и размножения». Состоянием системы будем называть некоторую совокупность работоспособных и отказавших устройств. Если состояния системы образуют такую цепь, в которой каждое состояние, кроме исходного и последнего, связано прямой и обратной связью с двумя соседними, а крайние состояния связаны с одним соседним, то схема процесса, протекающего в системе, называется схемой «гибели и размножения», а сам процесс – **процессом «гибели и размножения».**

Если в такой системе все потоки, переводящие систему из состояния в состояние, пуассоновские, то процесс называется **Марковским случайным процессом «гибели и размножения»** (термин ведет начало от биологических задач, процесс описывает изменение численности популяции. Переход из состояния в состояние происходит в момент гибели или рождения особи).

Можно сформулировать главные свойства простых процессов:

Марковский процесс: ход процесса не зависит от предыстории, все законы экспоненциальные.

Полумарковский процесс: если ход процесса не зависит от предыстории, но законы могут отличаться от экспоненциальных, то процесс называют полумарковским.

2. ЗАДАНИЕ ТРЕБОВАНИЙ

2.1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ. ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Две стадии задания требований. Следует различать а) выбор показателя и б) обоснование его численного значения.

Термины и определения, применяемые ниже, как правило, соответствуют ГОСТ 27.002-89. Введем некоторые дополнительные определения, необходимые для дальнейшего изложения и имеющие общий характер. Некоторые из них во избежание ошибочных толкований сопровождаются математическими пояснениями.

Введём обозначения. Будем считать, что изделие в каждый момент времени описывается i параметрами. Совокупности (наборы, векторы) их возможных значений $X=(X_1, X_2, \dots, X_i)$, принадлежащие некоторому множеству X , определяют состояние изделия. В простейшем случае это параметры, определяющие работоспособность или неработоспособность компонентов изделия. Вследствие возникновения и устранения неисправностей параметры меняются во времени t - имеет место случайный процесс смены состояний $X(t)$. Отдельные реализации процесса $X(t)$ будем называть траекториями процесса смены состояний g ; множество траекторий обозначим G , т. е. g принадлежит G . Полная исправность изделия на всем интервале времени работы t_p соответствует траектории g_0 . Будем считать, что параметры X_i принимают дискретные значения (например, это 0 и 1- отказ и работа), тогда и множество X дискретно.

Помимо параметров X_i , связанных с надежностью изделия, существуют параметры Z_i ненадежных, внешних факторов: характеристики исходного сырья, погодные условия, особенности объектов обслуживания. Они также могут меняться во времени, образуя аналогичные траектории S , принадлежащие множеству Z . Существует, кроме того, функционал $e(s, g)$, характеризующий результат, эффект от применения изделия.

Для однозначного понимания терминов, употребляемых при изложении, введем еще функцию работоспособности $y_i = y(X(t_i))$, характеризующую способность изделия выполнять свою работу в данный момент времени t_i . Определим ее как эффект, получаемый от изделия при сохранении фиксированных параметров X_i в течение всего времени работы t_p и усреднённый по Z . Ясно, что мгновенная характеристика y_i не определяет результат работы. Последний зависит от того, как будут меняться состояния изделия (а вслед за ними и значения y_i) на интервале t_p и как долго изделие будет оставаться в каждом из них. Одному и тому же значению y_i могут соответствовать различные состояния изделия, образующие некоторое подмножество X_i . Индексом θ отметим уровень номинальной работоспособности y_θ и соответствующее подмножество X_θ , включающее в себя состояния полной исправности изделия и неисправности, не влияющие на работоспособность. Так же отметим и траекторию g_θ , характеризующуюся пребыванием процесса $X(t)$ в подмножестве X_θ в течение всего времени работы. Индексом m обозначим полную неработоспособность.

Отказом в этих терминах будем называть переход процесса $x(t)$ из одного подмножества X_k в другое X_i с худшим значением y_i , т. е. с пониженным уровнем работоспособности, а также само пребывание в этом подмножестве. Отказы могут быть полными ($i = m$) или частичными ($0 < i < m$).

Восстановлением будем называть обратный переход с повышением уровня работоспособности. Таким образом, процесс y_i есть процесс отказов и восстановлений.

Следует отметить, что хотя подобное представление о функционировании изделий давно известно, в теории и практике надежности вместо него преобладает его сугубо частный случай. Считается, что множество значений y состоит только из двух значений y_0 и y_1 , а множество X распадается на два подмножества X_0 и X_1 , т. е. изделие может быть либо полностью работоспособным, либо полностью отказавшим. Большинство исследований посвящено процессам $X(t)$ и $y(t)$, тогда как изучение влияния этих процессов на выходной эффект, как правило, обходится стороной.

Два вида изделий. Будем различать *изделия вида I* с двумя уровнями работоспособности — номинальным и нулевым, и *изделия вида II* с многими уровнями, включая уровни пониженной, промежуточной работоспособности. Заметим, что иногда в этом же смысле употребляются термины «простые» и «сложные», но в данном цикле лекций им придается обычный смысл.

Строго говоря, подавляющее большинство изделий следует относить к виду II. Однако это влечет за собой ряд методических усложнений, которые оправданы лишь тогда, когда промежуточные уровни существенно отличаются от номинального и нулевого, а вероятность попадания изделия в соответствующие подмножества состояний не слишком мала. Иными словами, в ряде случаев может оказаться целесообразным внести в оценку некоторую ошибку, но свести все состояния изделия в два подмножества с двумя уровнями работоспособности. Это определяется требуемой точностью исследования.

Эффективность. Будем называть *эффективностью* изделия количественную меру выполнения изделия его функций. Показатель эффективности E является комплексным показателем качества. Определим его как математическое ожидание выходного эффекта e , т. е. $E = M(e)$. Далее этот показатель будем называть просто эффективностью. Им может быть либо некоторая размерная величина — средний доход, производительность, число обслуживаемых объектов, либо вероятность выполнения определенной задачи — передачи сообщения, доставки груза, обработки детали.

Два вида показателей надежности. Будем называть *техническими* такие показатели надежности, которые характеризуют процессы $X(t)$ и $y(t)$, т. е. процессы блуждания по состояниям или по уровням (вне связи с результатами работы изделия). К ним относятся средняя наработка на отказ (до отказа) T , среднее время восстановления T_v , интенсивности отказов (λ) и восстановлений (μ), все показатели долговечности и сохраняемости.

Оперативными будем называть такие показатели, которые характеризуют влияние процессов $X(t)$ и $y(t)$ на выходной эффект и в итоге на величину E . К ним относятся, например, коэффициент оперативной готовности $K_{ог}$, вероятность безотказной работы в течение времени выполнения задачи $P(t)$, коэффициент сохранения эффективности $K_{эф}$, выражающий отношение эффективности изделия с реальной надежностью к его эффективности при безотказной работе.

Подведём некоторые итоги, приведя перечень наиболее употребляемых показателей надёжности.

Технические показатели:

1. Средние наработки: до отказа T_0 ; между отказами T
2. Среднее время восстановления T_v
3. Интенсивности: отказов λ , восстановлений μ
4. Ресурс T_p , срок службы $T_{сл}$
5. Срок сохраняемости $T_{сохр}$

Для экспоненциальных (Пуассоновских) распределений: $T = 1/\lambda$, $T_v = 1/\mu$.

Оперативные показатели:

1. Вероятность безотказной работы - вероятность того, что объект безотказно проработает заданное время $P(t) = e^{-\lambda t}$
2. Коэффициент готовности - вероятность того, что объект окажется работоспособным в произвольный момент $K_2 = T / (T + T_v)$
3. Коэффициент оперативной готовности - вероятность того, что объект окажется работоспособным в произвольный момент и безотказно проработает заданное время $K_{ог}(t) = K_2 P(t)$
4. Коэффициент сохранения эффективности - отношение реальной эффективности объекта к её номинальному значению (эффективности исправного объекта)

$$K_{эф} = E/E_0, \quad E = K_{эф}E_0.$$

Отметим, что коэффициент готовности K_2 является показателем и техническим, и оперативным одновременно. С одной стороны, это вероятность пребывания изделия в подмножестве состояний X_0 в произвольный момент. С другой стороны, если изделие предназначено для выполнения очень коротких задач, то K_2 определяет вероятность того, что выполнение одной такой задачи не будет сорвано отказом.

Частным случаем технических показателей надежности являются *показатели долговечности*. Они характеризуют только один параметр процесса $x(t)$ — его общую продолжительность до достижения предельного состояния. Это событие в большинстве случаев (а особенно для сложных изделий) можно предвидеть и планировать. Оно не является неожиданным, как, например, отказ. Работа изделия не обрывается наступлением предельного состояния, а заканчивается заблаговременно. Такое окончание работы влияет не на ее результат, а на различные затраты: на новое изделие, на демонтаж старого и т. д.

2.2. ВЫБОР НОРМИРУЕМЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ

Рассмотрим вопрос о том, какими принципами следует руководствоваться при выборе показателей надежности (ПН) для применения в технических заданиях на разработку новых изделий и в технических условиях на изделия, выпускаемые серийно. Речь идет сначала о виде показателей, хотя и с учетом проблемы обоснования их численных значений. Сформулируем требования, предъявляемые практикой к таким ПН. Степень выполнения этих требований будет в дальнейшем критерием предпочтения того или иного ПН.

2.2.1. Требования, предъявляемые к нормируемым показателям надежности

Будем записывать требования, не учитывая пока возможности их выполнения (поскольку среди них нет ни одного безусловно обязательного, слово «должны» в приводимых ниже формулировках следует понимать как «желательно», «надо бы» и т. п.).

а. ПН должны отражать влияние надежности на выполнение основных функций изделия. ПН, отражающие это влияние, мы ранее назвали оперативными.

б. ПН должны определять надежность независимо от характера использования изделия (в том числе от времени выполнения задач, от последствий отказов и т. д.) как свойство собственно изделия, но так, чтобы она полностью определяла «поведение» изделия в работе и позволяла решать все основные задачи, связанные с надежностью. К последним относится и расчет оперативных ПН. ПН, удовлетворяющие этому требованию, мы назвали техническими.

Уже сейчас видно, что удовлетворить одновременно пп. «а» и «б» нелегко.

в. ПН в той или иной форме должны быть применимы к изделиям с многими уровнями. ПН для изделий с двумя уровнями должны быть их частным случаем.

г. Для всех задаваемых ПН должны существовать методы испытаний, как определительных, так и контрольных.

д. Чем лучше изделие соответствует своему назначению (чем выше эффективность изделия), тем выше должна быть характеристика его надежности и вероятность приемки на испытаниях. Отметим, что это естественное требование не выполняется в очень распространенном случае: когда заданы одновременно T и T_B .

е. Обоснование численных значений задаваемых ПН должно быть максимально облегчено.

ж. Выбор ПН для новой техники не должен зависеть от факторов, определяемых в ходе разработки. При составлении технического задания на еще несуществующее изделие затруднительно, например, указать число уровней работоспособности, наличие резерва и т. д.

Отметим, что это требование не относится к выбору ПН для технических условий на серийные изделия, о которых при передаче в производство известно практически все.

з. Принцип выбора ПН должен охватывать все величины, влияющие на ПН. Прежде всего это относится к времени работы, которое входит в ПН типа $P(t)$, $Koz(t)$.

и. Должны существовать методы, позволяющие рассчитывать ПН на этапе разработки изделия.

к. ПН должны иметь простой физический смысл.

По-видимому, ни одна система показателей не сможет удовлетворить сразу всем этим требованиям. Однако, как указывалось, выполнение каждого из них желательно, но без него все-таки можно обойтись. Так, некоторые организации обходятся даже без методов испытаний, проверяя ПН расчетным путем. Эта необязательность облегчает проблему, но она же порождает то множество решений, которое сейчас имеет место и в литературе, и в практической работе промышленности.

Обязательные требования. Очевидно, что выбор ПН решающим образом зависит от того, какие требования считаются наиболее важными. Мы будем считать обязательным только важнейшее обобщающее условие: задаваемые показатели вместе с методами их проверки должны обеспечить уровень надежности, достаточный для выполнения изделием его задачи. Это означает, что так или иначе должны быть обеспечены достаточные значения оперативных показателей.

Две группы изделий. При первой же попытке удовлетворить требование «а» все изделия распадутся на два множества — выделяется обширная группа изделий, для которых нормировать оперативные показатели вообще невозможно. Это изделия, предназначенные для решения самых разнообразных задач либо самостоятельно, либо в составе различных изделий большего масштаба, например, универсальные ЭВМ, устройства энергоснабжения (типовые преобразователи, выпрямители и пр.), измерительные приборы, связная аппаратура широкого применения. Важно то, что для этих изделий влияние отказов на выполнение задач неопределимо из-за множества вариантов этих задач. Так, дизельная передвижная электростанция вырабатывает переменное напряжение 220 В 400 Гц, и это напряжение может использоваться для самых разнообразных целей. Будем называть подобные изделия **изделиями общего назначения (ИОН)**.

В отличие от ИОН **изделия конкретного назначения (ИКН)** имеют определенную, известную задачу. Это специализированные ЭВМ, радиолокаторы, системы управления теми или иными процессами и т. п. Например, каждый локатор имеет конкретную и полностью определенную задачу: корабельный навигационный локатор — свою, аэродромный — свою и т. д. Поэтому для ИКН можно говорить о влиянии отказов изделия на результат той работы, в которой оно участвует.

Принципы назначения заявок к надежности изделий этих двух групп существенно различны. Кроме того, эти принципы различаются также для новых разработок и серийных изделий.

2.2.2. Выбор показателей для новых разработок. Изделия общего назначения

Последовательное рассмотрение сформулированных в п. 2.1.1 заявок позволяет определённым образом удовлетворить максимум из них. Это было сделано в работе [1] и затем воплощено в ГОСТ 27.003-90 [3].

Рассмотрим только две проблемы, возникающие при разработке общего подхода к выбору ПН.

а) Если задать несколько ПН (хотя бы два), то повышение характеристик надежности и вероятности приемки для лучшего изделия отнюдь не гарантируется. Вот пример. Пусть заданы $T=100$ ч и $T_B=0,5$ ч, и фактически получены те же цифры (ошибкой опыта пренебрегаем). Появляется возможность исключить отказы наименее надежного узла, которые составляют, скажем, 40% всех отказов, но устраняются в среднем за 0,2 ч. Нетрудно подсчитать, что после такой доработки будут получены $T=170$ ч и $T_B=0,7$ ч, и изделие уже не будет соответствовать требованиям (из-за T_B), т. е. будет считаться худшим! Во всех отчетах оно станет фигурировать как «низконадёжное», а на первых же испытаниях будет забраковано. Ясно, что подобных доработок промышленность проводить не станет. В то же время доработанное изделие в подавляющем большинстве применений работало бы лучше, чем исходное. Любой из известных оперативных показателей возрос бы, так как снижение ремонтпригодности здесь полностью перекрывается повышением безотказности. Во все оперативные ПН T_B входит только через K_2 , который в данном случае возрастает с 0,995 до 0,996, а T входит в формулы самостоятельно. Если же в ТЗ вместо T_B был бы применен комплексный показатель K_2 , отражающий тот же уровень ремонтпригодности (т.е. $K_2 = 0,995$), то повышение надежности доработанного изделия было бы очевидным. Так безобидная на первый взгляд тонкость в задании заявок ведет к неверным техническим решениям.

Сказанное относится и к тому случаю, когда требования задаются в виде набора заявок к компонентам. Вообще показатель, внесенный самостоятельно в техническое задание, уже чисто формально не может быть скомпенсирован другими (фактическая компенсация не будет учтена при проверке).

б) В том же случае (если задать несколько ПН) возникают неприятности на испытаниях, а именно: даже если проверять каждый i -й ПН с равными рисками поставщика и потребителя ($\alpha_i = \beta_i$), то для изделия в целом риск поставщика резко возрастает, а риск потребителя убывает. Это, естественно, связано с тем, что для приёмки изделия должны соответствовать требованиям все ПН, а для браковки достаточно одного несоответствия (любого из нескольких).

Из всего сказанного следуют три важных практических вывода:

- следует оставить всякие попытки задавать оперативные показатели для ИОН, а применять для них технические ПН;

- задавать как можно меньше ПН, причём зависимые ПН предпочтительнее;
- для ИОН вида II (с многими уровнями) либо задавать требования отдельно для тех компонентов, отказ которых является частичным отказом изделия, и отдельно для совокупности остальных, либо считать все отказы полными и задавать показатели на изделие в целом, сводя таким путем все уровни его работоспособности к двум и заведомо занижая результат.

Вывод, узаконенный стандартом ГОСТ 27.003: для ИОН вида I задавать T и K_2 ; вместо T допускается λ . Для ИОН вида II приходится либо задавать те же ПН отдельно на основные компоненты, либо считать полными все без исключения отказы, заведомо занижая результат. Оба варианта оставляют желать лучшего, но другого выхода для вида II пока нет.

До последнего времени для K_2 отсутствовали методы контрольных испытаний, были только формулы для доверительных границ. После разработки изложенных принципов выбора ПН, где K_2 занимает столь важное место, удалось разработать и методы контроля K_2 [1]. О них более подробно сказано в приложении Б.

Возможны случаи, когда желательно нормировать еще какие-нибудь дополнительные ПН. Так, для изделий цифровой техники типа ЭВМ часто приходится задавать еще среднюю наработку на сбой, поскольку сбои влияют на работу изделия по-своему и входят в оценки оперативных ПН самостоятельно. Однако, задавая дополнительные показатели, следует всегда иметь в виду связанные с этим последствия. Особенно следует предостеречь против попыток задавать параметры формы распределений, отличных от экспоненциального. Поскольку для ИОН нельзя указать лучшие и худшие формы распределений, нормирование (и контроль) этих параметров приведет лишь к бессмысленному забракованию ряда изделий. Это, конечно, не означает, что подобные параметры вообще не надо применять при анализе надежности. Напомним еще раз, что речь идет о нормируемых показателях, т. е. о тех, по которым изделие сдается и принимается. При необходимости для работы можно привлекать какие угодно ненормируемые показатели.

2.2.3. Показатели для новых разработок. Изделия конкретного назначения

В данном случае главную роль играет коэффициент сохранения эффективности $K_{эф}$, поэтому целесообразно рассмотреть этот ПН более подробно.

Как указывалось выше, выполнение изделием его функций характеризуется некоторым комплексным показателем качества — эффективностью E . Эффективность зависит от надежности изделия (факторы надежности обозначены множеством траекторий изделия G) и других ненадежных факторов (будем обозначать их символом множества Z , которому они принадлежат), т. е. $E=E(G, Z)$. При некоторых жестких ограничениях функцию $E(G, Z)$ можно представить в виде произведения, выделив в качестве сомножителя номинальную эффективность изделия E_0 , т. е. его эффективность при полной исправности. Очевидно, что E_0 от надежности не зависит, и можно записать:

$$E(G, Z) = R(G, Z) E_0(Z).$$

Сомножитель $R(G, Z)$ как раз и представляет собой оперативный показатель надежности, введенный ранее под названием коэффициента сохранения эффективности $K_{эф}$:

$$R(G, Z) = E(G, Z) / E_0(Z) = K_{эф}.$$

Отсюда следует и ограничение: показатель эффективности должен быть таким, чтобы $E_0(Z) > 0$. Как правило, большей эффективности изделия соответствуют и большие значения показателя E , а поскольку отказы могут приводить только к снижению выходного эффекта, то $E_0(Z)$ будет максимальным значением E , т. е. $E_0(Z) \geq E(G, Z)$. Тогда, очевидно, $K_{эф} < 1$, причем с повышением надежности при прочих равных условиях $K_{эф} \rightarrow 1$. В дальнейшем будем считать, что показатель E выбран именно таким образом. В тех случаях, когда E не удовлетворяет указанным требованиям, обычно возможен другой выбор показателя. Так, процент брака на выходе автоматической линии станков («неудобный» показатель эффективности) достаточно заменить процентом выхода годной продукции.

Не следует отождествлять E_0 — эффективность реального исправного изделия — с эффективностью гипотетического идеально надежного изделия. Последнее, очевидно, должно иметь бесконечные стоимость, объем, массу и другие нереальные параметры.

Физический смысл $Kэф$ прост: он показывает, какая часть номинальной эффективности изделия сохраняется при наличии отказов последнего; $1 - Kэф$ есть та относительная величина, на которую снижается эффективность вследствие отказов. Например, если эффективностью некоторой системы является приносимый ею доход, то $Kэф = 0,9$ означает, что из-за отказов устройств этой системы доход в среднем будет на 10% меньше номинального.

Если эффективностью изделия является вероятность выполнения им некоторой задачи, то $Kэф$ дополнительно приобретает смысл вероятности того, что выполнение задачи не будет сорвано из-за отказов. Легко показать, что $Kэф$ есть вероятность того, что задача, выполняемая при отсутствии отказов, будет выполнена и при их наличии. Но это и есть вероятность того, что отказы не сорвут выполнение задачи.

Таким образом, для расчета E можно определять отдельно E_0 и $Kэф$, причем E_0 определяется без учета отказов. Эта возможность широко используется на практике, так как она существенно облегчает расчет и испытания самых сложных изделий.

В разделе 3.4 показано, что для изделий вида I $Kэф$ во многих практически важных случаях равен одному из «классических» оперативных ПН (т.е. Kz , $P(t)$ или $Koz(t)$). Когда и во что переходит $Kэф$, показывает таблица 3.4.1.

Вывод ГОСТ:

- для ИКН вида I задавать $Kэф$ либо непосредственно, либо в виде одного из «классических» ПН, в которые переходит $Kэф$ в случае конкретного изделия;
- для ИКН вида II задавать только $Kэф$.

Справедливости ради нужно отметить, что к $Kэф$ ещё не привыкли специалисты, работающие в области надежности. О нем мало пишут в литературе, упоминания в книгах часто не идут дальше введений, и многие имеют превратное представление о нем.

Обсудим аргументы, которые приводятся против использования $Kэф$.

1) «Оценка $Kэф$ требует непременно оценки E и E_0 , чтобы затем определить $Kэф$ делением». Эта ошибка порождена недостатком информации. Методы оценки $Kэф$ как расчетом (гл. 3), так и экспериментом (гл. 4) многообразны, и только метод статистического моделирования (§ 3.1) сводится к делению E/E_0 . В остальных же случаях, как правило, делается наоборот: E вычисляется как произведение определяемых отдельно $Kэф$ и E_0 .

2) «Если задавать $Kэф$, то одновременно надо задавать эффективность E_0 в виде численной характеристики». Это ошибочное утверждение. В дополнение к $Kэф$ требуется только качественное определение показателя эффективности для данного изделия («эффективностью изделия считается среднегодовой доход» и т. п.). Сама же эффективность может быть задана набором параметров, таких как производительность, скорость, точность и т. п., что очень часто имеет место на практике. В отличие от $Kэф$ для E не существует общих методов оценки, за исключением прямого эксперимента для вероятностных показателей. Там, где в расчетах $Kэф$ используются относительные величины (см. гл. 3), в расчетах E требуются абсолютные, а отсутствие общих формул, подобных формулам в [7], чрезвычайно усложняет как расчеты, так и применение испытаний расчетно-экспериментальным методом.

Отметим еще, что если есть возможность хотя бы расчетной оценки E_0 , то уже правильнее задать просто E с учетом надежности как самый обобщенный показатель, не задавая отдельно $Kэф$ и E_0 .

3) «Чтобы определить $Kэф$ для изделия с многими уровнями, необходимо оценить относительную эффективность состояний изделия (так называемые «веса» состояний), что исключительно трудно». На самом деле использование «весов» не усложняет, а упрощает оценку надежности. Оценка относительной эффективности состояний изделий необходима всегда, но если не использовать значения «весов» из интервала $[0,1]$, то приходится применять только два крайних варианта: 0 и 1. Каждому состоянию приписывается одно из этих значений «веса», хотя внешне это оформлено как определение отказа изделия: отказы таких-то устройств не учитываются, отказы таких-то считаются полным отказом. Именно страх перед использованием промежуточных (т.е. реальных) значений «весов» привел к проблеме «что считать отказом?» Таким путем во все оценки вводится еще большая ошибка, так как веса все равно фиксируются, но гораздо грубее: ошибка при оценке реального веса содержалась бы как минимум в следующем знаке. Так под предлогом борьбы за точность ее снижают на порядок.

Отметим, что указанный прием всегда имеется в резерве и при работе с ***Кэф***, но здесь его применяют только к действительно «трудным» весам, а не ко всем без исключения. Кроме того, существуют способы расчета, позволяющие обходиться вообще без «весов» (см. п. 3.3).

Боязнь трудностей, связанных с использованием эффективности состояний, широко распространена среди специалистов по надежности, возможно, еще и потому, что один из родоначальников этого направления И. А. Ушаков, не придавая значения достоинствам относительных значений весов, в своих работах применял только абсолютные. К последним же относятся все трудности, связанные с оценкой эффективности (см. выше).

Таблица 2.1.1

Вид изделия	Нормируемые ПН для изделий	
	общего назначения	конкретного назначения
I	<p><u>Без восстановления:</u> <i>T (или λ)</i> <u>С восстановлением:</u> <i>T (или λ) + Kг.</i> Допускается минимум дополнительных технических показателей</p>	<p><i>Кэф</i> Допускаются показатели, в которые переходит <i>Кэф</i> для данного изделия: <i>Kг, P(t), Kог(t)</i> и др.</p>
II	<p>Те же ПН, но заданные отдельно на основные компоненты, или те же ПН на изделие в целом, но все отказы считаются полными</p>	<p><i>Кэф</i></p>

Особенности технического обслуживания		Формулы для расчета $K_{эф}$ при выходном эффекте		
перед работой	в ходе работы	$\varepsilon(\omega, g) = A(\omega) \sum_n t_n(g)$	$\varepsilon(\omega, g) = (B\omega) \sum_n m_n(g)$	$\varepsilon(\omega, g) = \begin{cases} C(\omega) & \text{при } t_1 \geq t_p \\ 0 & \text{при } t_1 < t_p \end{cases}$
Включено, восстанавливается	Восстанавливается	K_r	$K_{ог}(t_{оп})$	$K_{ог}(t_p)$
Включено, восстанавливается	Не восстанавливается	$\frac{K_r T}{t_p} (1 - P(t_p))$ (exp)	$\frac{K_r T}{t_p - t_{оп}} (P(t_{оп}) - P(t_p))$ (exp)	$K_{ог}(t_p)$
К работе допускаются только исправные изделия	То же	$\frac{T}{t_p} (1 - P(t_p))$ (exp)	$\frac{T}{t_p - t_{оп}} (P(t_{оп}) - P(t_p))$ (exp)	$P(t_p)$
Выключено (хранение). К работе допускаются изделия без отбора и ремонта	" — "	—	—	$P_{xp} P(t_p)$

С учётом сказанного процедура составления задания выглядит как определение (выбор) и согласование между заказчиком (потребителем) и разработчиком (изготовителем) изделия:

- номенклатуры и значений показателей надежности;
- понятия «отказ», если изделие рассматривается как изделие вида I;
- понятия «выходной эффект» или «эффективность», если задан коэффициент сохранения эффективности (изделие рассматривается как изделие вида II);
- критериев предельных состояний изделия (средний, капитальный ремонт; списание), применительно к которым установлены требования по долговечности и сохраняемости.

Иногда целесообразно сразу оговорить методы контроля соответствия изделия заданным требованиям по надежности, иногда - ограничения по конструктивным, технологическим и эксплуатационным способам обеспечения надежности (например, уровень подготовки обслуживающего персонала).

2.2.4. Показатели для серийно выпускаемых изделий

Для серийно выпускаемых изделий требования несколько упрощаются. Для них особенно важны упрощения в части методик испытаний, сокращение времени, объема проверок и общее удешевление испытаний, что для опытных образцов не так существенно. Это является серьезным дополнительным требованием. Требование "ж" отпадает, так как при составлении ТУ, т. е. при передаче изделия в серийное производство, об изделии известно уже практически все. Требование "и" (наличие методов расчета) в принципе относилось только к новым разработкам. Наконец, задача обоснования численных значений задаваемых показателей (требование "е") здесь решается совершенно иначе (см. раздел 2.2): уровень надежности серийных изделий должен просто быть равен уровню надежности опытных образцов (естественно, с поправкой на доработки).

Изменение показателей. Из вышеизложенного вытекает только одно небольшое упрощение. Оно сводится к тому, что теперь для ИКН с двумя уровнями можно задавать вместо $K_{эф}$ те показатели, которым он равен в каждом конкретном случае (см. табл. 2.1.2). Действительно, при серийном производстве таких значительных изменений структуры, времени работы и т. д., как в ходе разработки, ожидать

не приходится. Конечно, и здесь возможны изменения, так что все же было бы лучше задавать *Кэф*. Напомним, что переход от *Кэф* к классическим ПН является лишь уступкой традициям.

Таким образом, показатели, вносимые в ТУ, должны выбираться практически по тем же критериям, что и показатели для ТЗ. Главные же упрощения касаются методик контроля заданных ПН вследствие того, что многие технические показатели теперь можно считать известными и равными показателям опытного образца.

Занижение требований ради сокращения объема проверки. Этот прием заслуживает специального рассмотрения. Он заключается в том, что требуемый уровень показателя надежности подменяется заниженным (на 1—3 порядка) и даже недопустимым для потребителя, но требующим приемлемого объема испытаний при внешне приемлемых значениях точности и достоверности. Действительно, при высокой надежности изделий для достаточно строгого контроля ПН может потребоваться слишком большой объем испытаний, превышающий возможности изготовителя. Однако рассматриваемый прием является неудачным выходом из положения: устанавливается все-таки строгий контроль, но не того уровня! Тем не менее этот принцип многие годы находит поддержку в некоторых организациях. Именно поэтому данные справочников по надежности радиоэлементов на несколько порядков расходятся с приведенными в ТУ на те же элементы — в справочниках приводятся фактические данные, которыми и рекомендуется пользоваться потребителям. При этом поставщики элементов не забывают указывать, что справочник не является юридическим документом для предъявления претензий рекламационного характера — иными словами, за соответствие изделий требованиям справочника никто не отвечает.

Иногда занижение требований вуалируется применением специфических показателей. Это, например, показатели типа «минимальной наработки» $t_{мин}$, определяемой как «наработка, в течение которой отказы практически отсутствуют». В случае отказа отказавшее изделие (но не партия) бракуется. Поскольку вероятность отсутствия отказов не задается, такие показатели ничего не говорят о надежности изделия.

В ТУ часто встречаются требования, выполнение которых не проверяется, но обеспечивается схемой, конструкцией и технологией изготовления изделия. К ним могут относиться требования, проверка которых либо сильно затруднена (например, срок службы), либо является просто излишней (например, площадь, занимаемая ЭВМ). Тем не менее запись этих заявок в ТУ необходима, так как только она обеспечивает потребителю возможность предъявить претензии, если в ходе эксплуатации изделия все же будет установлено их невыполнение. Напомним, что в эксплуатации проверяются практически все требования без исключения.

Итак, в крайнем случае на производстве можно обойтись вообще без проверки ПН. Если все же имеется возможность провести испытания даже малого объема, то ее нужно использовать. Тогда ТУ дополняют методикой проверки с теми (пусть даже низкими) точностью и достоверностью, которые могут быть достигнуты при данном объеме.

Выводы по разделу 2. Принципы выбора показателей надежности, которые можно сформулировать исходя из всего сказанного, отражены в табл. 2.1.1. Как было указано, ПН, в которые переходит *Кэф* для наиболее распространенных изделий вида I, приведены в табл. 2.1.2 (комментарии к этой таблице – в п.3.4). Поэтому табл. 2.1.2 следует рассматривать как иллюстрацию и дополнение к табл. 2.1.1.

В тех случаях, когда долговечность и сохраняемость не учитываются в показателях табл. 2.1.1, их следует нормировать дополнительными показателями. При этом показатели долговечности следует рассматривать как характеристики общей продолжительности работы изделия и нормировать исходя из стоимостных соображений. Показатели сохраняемости следует рассматривать как характеристики устойчивости изделия к внешним воздействиям и нормировать аналогично другим подобным характеристикам (пример: изделие должно допускать воздействие температур в диапазоне $\pm 40^\circ\text{C}$, песка, пыли, солнечной радиации, транспортировку автотранспортом по грунтовым дорогам на расстояние до 300 км, хранение в неотопляемом помещении сроком до 2 лет).

Рекомендации табл. 2.1.1 относительно ИОН вида II оставляют желать лучшего, так как оба предлагаемых варианта имеют серьезные недостатки, подробно обсужденные выше. Однако других вариантов пока нет.

2.3. ОБОСНОВАНИЕ ТРЕБУЕМОГО УРОВНЯ НАДЕЖНОСТИ

Численные значения задаваемых показателей, независимо от их вида и количества, определяют требуемый уровень надежности изделия. Выбор (обоснование) этих значений можно производить исходя либо из того, **что нужно** для выполнения заданных функций изделия, либо из того, **что можно** сделать при существующем уровне техники и имеющихся ограничениях. Разумеется, определив требования по принципу **что нужно**, следует проверить, соответствует ли это тому, **что можно**, и наоборот. При обосновании требуемого уровня надежности новых разработок ИКН, как правило, применимы оба указанных принципа. К новым разработкам ИОН применим только принцип **что можно**. Уровень надежности изделий, передаваемых в серийное производство, уже не должен подлежать обсуждению, он определяется уровнем опытных образцов. Поэтому три перечисленных группы изделий в данной главе рассматриваются отдельно.

Отметим, что проблему выбора требуемого уровня надежности можно решать независимо от того, в виде каких показателей надежность будет задана в технической документации. Поэтому в данном разделе будем обозначать показатель надежности изделия обобщенным символом R , допуская, что он может быть любым показателем и даже набором показателей, причем их выбор может и не соответствовать рекомендациям, приведенным в п.2.1. Иначе говоря, R здесь означает лишь определенный уровень надежности изделия. Можно принять, что значение $R=1$ соответствует абсолютно надежному изделию, а $R=0$ — абсолютно ненадежному.

2.3.1. Требуемый уровень надежности новых разработок. Изделия конкретного назначения

Постановка задачи. Для ИКН принцип **что нужно** формулируется так: уровень надежности изделия должен быть не ниже некоторого минимального $R_{мин}$, при котором использование изделия по назначению еще имеет смысл. Разумеется, на практике далеко не всегда известно $R_{мин}$ в виде цифры, однако по крайней мере известны области нежелательных и недопустимых значений R . Выше этих значений любая надежность допустима, но более высокая, конечно, предпочтительнее.

Теоретически можно построить изделия с любой, как угодно высокой надежностью, применив, например, аппаратную или временную избыточность в той или иной форме и в соответствующих масштабах. В широких пределах меняется надежность и от использования элементов того или иного качества. Однако на практике применение всех этих мер ограничивается различными факторами: стоимостью, массой, размерами и т. п. Будем считать для простоты, что ограничивающий фактор для каждого конкретного изделия один, тем более, что в большинстве случаев при повышении надежности изделия одно из ограничений нарушается значительно раньше других. Будем считать, что этот фактор — стоимость, поскольку для других ограничений (объема, массы и пр.) все изложенное далее справедливо без всяких изменений. Наличие этих ограничений (обозначим наше ограничение **Согр**) выражает суть принципа **что можно**.

Если временно отвлечься от ограничений, то необходимо иметь в виду то обстоятельство, что расходы на повышение надежности могут не перекрыться выигрышем от него. Очевидно, существует определенный оптимальный уровень надежности, выше которого выделение дополнительных средств хотя и возможно, но нецелесообразно. Действительно, по мере повышения надежности эффективность изделия обычно приближается к номинальному значению E_0 , т. е. достигает «насыщения» (рис. 2.2.1). Отметим, что кривая $E(R)$ может, вообще говоря, начинаться не с нулевого, а с отрицательного значения E , поскольку абсолютно ненадежное изделие приносит скорее вред, чем пользу. Что касается расходов C на повышение надежности, то они возрастают неограниченно. В итоге задача ставится так: необходимо определить уровень надежности изделия, как можно более близкий к оптимальному и притом удовлетворяющий упомянутым ограничениям: $R > R_{мин}$, $C(R) < C_{огр}$.

Решение задачи. Обобщенная схема решения этой задачи приведена на рис. 2.2.2. Рассмотрим различные пути решения для 4-х частных случаев, определяемых соотношением выходного эффекта изделия и затрат на обеспечение требуемой надежности.

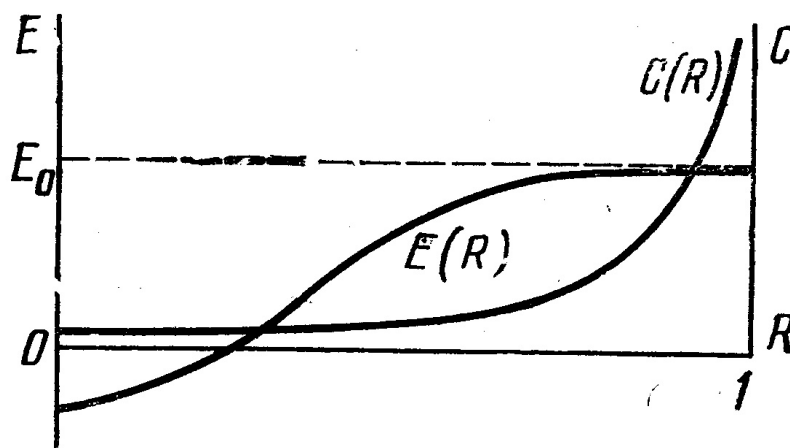


Рис.2.2.1

а. Выходной эффект и затраты на обеспечение надежности — величины одного и того же вида (измеряются в одних и тех же единицах) — чаще всего это экономический эффект и денежные расходы. В этом случае из них можно составить некоторую обобщающую целевую функцию: разность, отношение и т. д. Если важно обеспечить максимум абсолютного значения эффекта, то следует вычислять результирующую эффективность $\Delta E(R) = E(R) - C(R)$. Разность $\Delta E(R)$, очевидно, имеет максимум по R (рис. 2.2.3), который и определяет оптимальный уровень надежности R_{opt} . Если важно получить максимум эффекта на единицу затраченных средств (относительный эффект), то следует пользоваться отношением $E(R)/C(R)$. Построение оптимальной зависимости $C(R)$ рассмотрено далее, поскольку эта задача входит во все ветви схемы.

После того как оптимум найден, необходимо проверить выполнение ограничения по стоимости. Если оно не выполняется (оптимум лежит справа от $C_{огр}$), то целесообразно задать максимальную надежность, достижимую при данном ограничении, т. е. $R(C_{огр})$. Однако теперь может оказаться, что данная надежность не обеспечивает приемлемого выходного эффекта, поэтому требуется проверить выполнение и этого ограничения ($R(C_{огр}) > R_{огр}$). Если оно не выполняется, то задача не решается — необходим пересмотр исходных данных, ограничений и т. д.

Очевидно, что в ряде случаев можно так или иначе сократить работу: ограничить построение зависимости $C(R)$ зоной допустимых значений C или зоной оптимума, если последний как-то намечается; начать с проверки неравенства $R(C_{огр}) > R_{огр}$, если видно, что оно наиболее критично, и т. п. Следует, однако, иметь в виду, что для получения даже одной точки оптимальной зависимости $C(R)$ необходимо построение всего участка этой зависимости от начального варианта до данной точки.

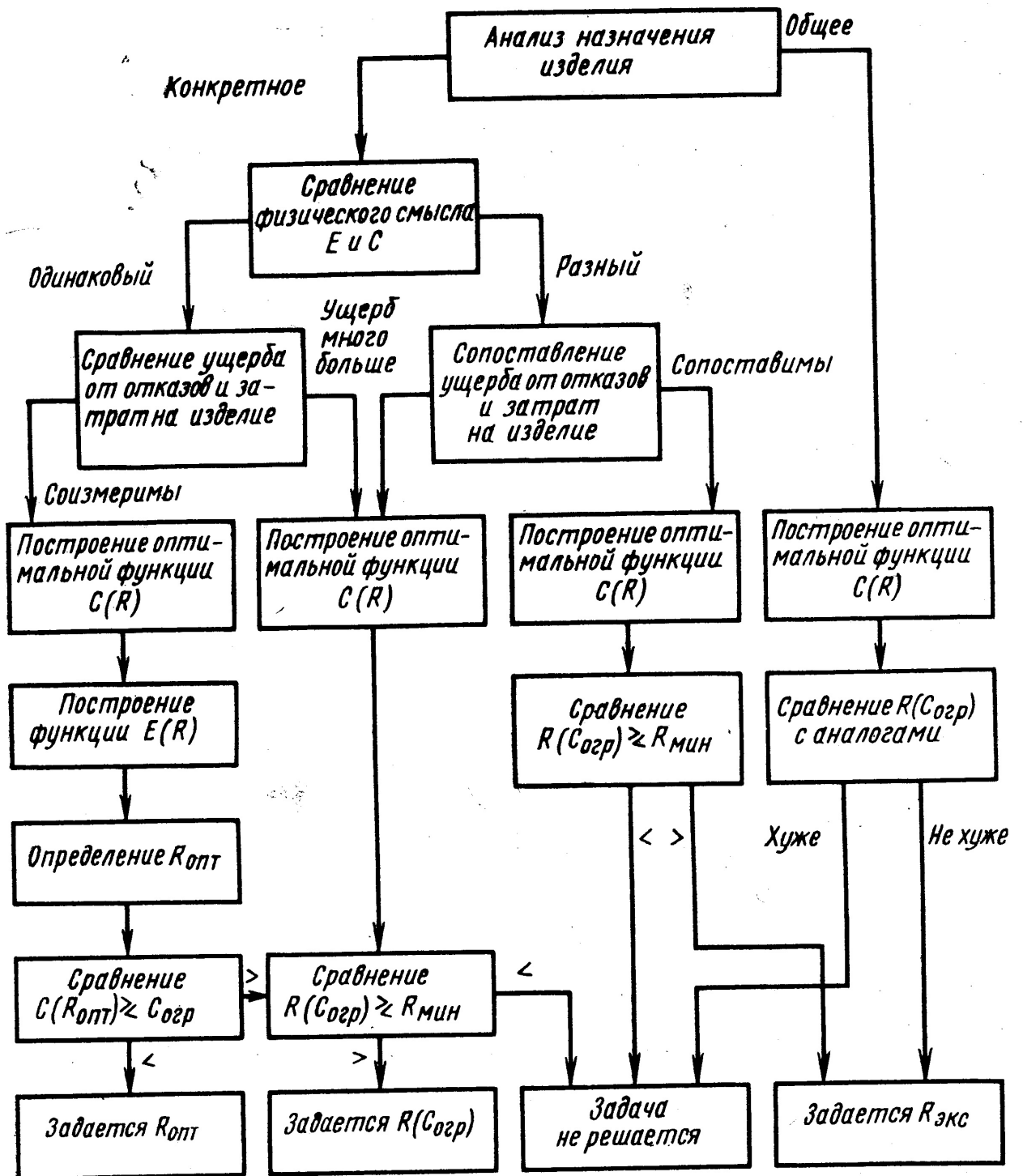


Рис.2.2.2

E, C

$C(R)$

Рис. 2.2.3

б. Выходной эффект и затраты на обеспечение надежности — величины одного и того же вида, но ущерб от отказов очень велик (несоизмерим с затратами на надежность). Это может быть по двум причинам: либо исправное изделие имеет очень высокий эффект, а при отказах он резко уменьшается; либо отказы наносят такой большой вред, что эффект достигает больших отрицательных значений. Примером второго варианта может быть устройство автоматизации химической установки, отказы которого вызывают взрыв и гибель установки. В обоих случаях оптимум R_{opt} сильно смещается вправо, что означает целесообразность обеспечения очень высокой надежности, а значит, и вложения очень больших средств. Очевидно, что при этом решающим окажется ограничение по C : таких средств у заказчика просто нет и достичь оптимума невозможно. Поиск оптимума отпадает, а задача решается, начиная сразу с определения $R(C_{огр})$ по построенной оптимальной зависимости $R(C)$.

Как и в случае «а», на этом пути проверяется, обеспечивает ли $R(C_{огр})$ приемлемый выходной эффект, т. е. выполнено ли $R(C_{огр}) > R_{огр}$, и т. д.

в. Выходной эффект изделия и затраты на надежность — величины разного вида., отказы изделия ведут к большим потерям либо из-за утраты высокой эффективности, либо из-за катастрофических последствий, как в случае «б». Очевидно, что и при этом любые расходы на повышение надежности будут оправданы и надежность будет определяться имеющимися средствами. К таким изделиям относятся, в частности, все изделия, от которых зависит безопасность людей: ряд самолетных и судовых агрегатов, противопожарное оборудование и т. п. Хотя затраты на надежность нельзя сравнивать с выходным эффектом таких изделий, тем не менее ясно, что человеческая жизнь неизмеримо важнее любых затрат. Отсюда сразу следует, что оптимальный уровень надежности в подобных случаях равен единице — это и есть теоретическое решение задачи, мало что дающее практику. Таким образом, задача здесь должна решаться так же, как и в случае «б»: следует стремиться к повышению надежности до тех пор, пока не будут исчерпаны возможности заказчика.

г. Выходной эффект изделия и затраты на надежность — величины разного вида, но отказы изделия не ведут к серьезным последствиям; примером может быть телевизор индивидуального пользования. Здесь оптимальный уровень надежности существует почти в том же смысле, что и в случае «а»: недостаточная надежность ведет к низкой эффективности, а чрезмерная — к недопустимым затратам. Более того, можно утверждать, что этот оптимум лежит как раз в области реальных значений надежности, где промышленность действительно может по выбору обеспечивать тот или иной

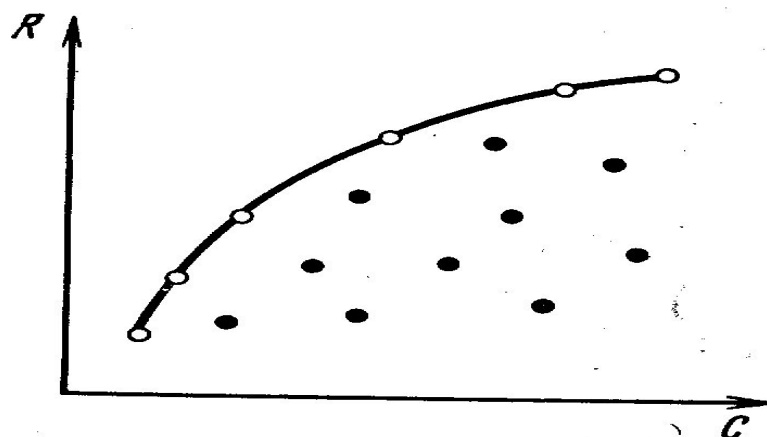
уровень. Но, к сожалению, вычислить этот уровень исходя из сопоставления эффекта и затрат, по-видимому, невозможно. Наиболее реально определять его так называемым экспертным методом. Этот термин мы будем употреблять в широком смысле, имея в виду не только ту или иную обработку мнений экспертов, но и сравнение с аналогами, изучение отзывов с мест эксплуатации, анализ спроса на первые партии изделий уже в ходе их выпуска (с последующими доработками и корректировкой заявок) и т. п.

Естественно, что и здесь существует ограничение по затратам $C_{огр}$, и максимально достижимый при этом уровень надежности $R(C_{огр})$ может оказаться неприемлемым с точки зрения выходного эффекта. Поэтому работа экспертов должна начинаться с проверки условия $R(C_{огр}) > R_{мин}$, и если оно выполняется, то выбирают требуемый уровень $R_{опт}$ в диапазоне от $R_{мин}$ до $R(C_{огр})$.

Отметим, что не следует понимать буквально все операции, показанные на рис. 2.2.2. Например, для сравнения $R(C_{огр})$ с $R_{мин}$ не обязательно устанавливать $R_{мин}$ — достаточно проанализировать $R(C_{огр})$ с точки зрения выполнения работы изделием. Если этот уровень приемлем, то, очевидно, $R(C_{огр}) > R_{мин}$, и наоборот. Зачастую ограничение по затратам формулируется не в виде конкретного значения $C_{огр}$, а лишь в виде последствий, к которым приводят те или иные затраты. Тогда можно указать диапазоны затрат, которые считают допустимыми, нежелательными (в той или иной степени) и наконец, недопустимыми. В этом случае сравнение, например, $C_{опт}$ с $C_{огр}$ проводится путем анализа $C_{опт}$, и если оно признается приемлемым, то можно считать $C_{опт} < C_{огр}$. Построение оптимальной зависимости $R(C)$ (см. ниже) также не всегда необходимо.

Построение оптимальной зависимости надежность — стоимость имеет особое значение в общей проблеме обоснования требуемой надежности. Во-первых, эта зависимость нужна для определения максимального уровня надежности, достижимого при заданном ограничении, — к этому во многих случаях, как мы видели, сводится проблема обоснования уровня для изделия в целом. Во-вторых, как мы увидим далее, та же зависимость используется при распределении требований (квот) к компонентам изделий.

Очевидно, что изделие с одной и той же надежностью может быть построено разными способами, а, следовательно, с разными затратами. Из них, очевидно, предпочтительнее наиболее дешевый вариант. И аналогично из нескольких вариантов с одинаковой стоимостью предпочтительнее самый надежный. Зависимость $R(C)$, используемая при обосновании требований, должна быть оптимальной в том смысле, что каждой ее точке должна соответствовать наибольшая при данной стоимости надежность и наименьшая при данной надежности стоимость. Решение этой задачи осуществляется путем перебора возможных вариантов построения изделия, причем критериями для предпочтения того или иного варианта являются надежность R и стоимость C .



Если каждая из этих точек соответствует определенным значениям R и C , то очевидно, проходит через наиболее надежные варианты, соответствующие определенной стоимости.

Если каждая из этих точек соответствует определенным значениям R и C , то очевидно, проходит через наиболее надежные варианты, соответствующие определенной стоимости.

Остальные варианты заведомо хуже, и их рассмотрение является нежелательной работой, лишь увеличивающей общую трудоемкость решения (в [7] оптимальная зависимость $R(C)$ названа доминирующей последовательностью).

Если общее количество вариантов невелико, то опытный разработчик интуитивно осуществляет такой отбор и при выполнении всех операций, указанных на рис. 2.2.2, использует оптимальную зависимость без специального ее построения. Иными словами, при рассмотрении вариантов более надежных и дорогих или менее надежных и дешевых такой разработчик ограничивается оптимальными вариантами, не отвлекаясь на другие. Основываясь на интуиции и опыте, можно построить оптимальную зависимость, не используя никаких научных методов. Однако при большом количестве вариантов построения изделия этот путь может приводить к большим ошибкам. В этом случае не обойтись без применения сравнительно строгих математических процедур. Речь идет о методах направленного перебора, которые позволяют строить огибающую при минимальном объеме вычислений, связанных с другими точками множества. Очевидно, что на этапе обоснования заявок к надежности разрабатываемого изделия, когда все варианты могут быть известны лишь приблизительно, достаточно самых простых, приближенных методов.

Чтобы не рассматривать конкретные варианты, иногда пытаются использовать зависимости $R(C)$ в виде функций, приводимых в тех или иных литературных источниках. Однако эти зависимости обычно настолько далеки от реальных, что их использование даже на начальном этапе не точнее интуитивного подхода. С другой стороны, анализируя конкретные варианты, исследователь сталкивается с трудностями оценки стоимости изделия (или его компонентов) при различных способах повышения надежности, включая применение высоконадежных деталей, снижение коэффициентов нагрузки, разработку схем, устойчивых к уходу параметров и т. п.

Сравнительно легко эта задача решается только при резервировании. Поэтому на практике во многих случаях можно проводить перебор вариантов исходя из предположения о том, что для повышения надежности применяется либо резервирование, либо мероприятия, эквивалентные резервированию по приращению надежности и стоимости. Это тем более оправдано, что резервирование — обычно действительно реализуемый способ повышения надежности, особенно в сложных изделиях. Поэтому данную задачу можно решать всеми методами, предназначенными для оптимизации резервирования. Эти методы хорошо известны и описаны в литературе, например, в [7].

Следует предостеречь от использования формул расчета, идеализирующих резервируемые устройства в части контроля и переключения, т. е. предполагающих безотказное переключение и полный контроль как основных, так и резервных устройств. Расчет по таким формулам дает сильно завышенную оценку надежности для устройств, у которых указанные факторы хоть немного отличаются от идеальных.

Простейший способ перебора для оперативных показателей кратко состоит в следующем [7]:

- а) определяется «нулевой» вариант построения изделия, в котором резерв отсутствует;
- б) рассматриваются варианты, в каждом из которых введено одно резервное устройство одного типа; для каждого из этих вариантов подсчитываются приращения показателя надежности изделия ΔR и его стоимости ΔC ;
- в) выбирается вариант с максимальным отношением $\Delta R/\Delta C$; резерв, принятый в данном варианте, в дальнейшем не пересматривается;
- г) рассматриваются варианты, в каждом из которых введено еще по одному устройству каждого типа, включая вариант с добавочным резервом уже принятого типа; подсчитываются значения ΔR и ΔC ; далее все повторяется, начиная с п. в). При этом последовательность выбранных вариантов образует искомую кривую — огибающую множества, оптимальную зависимость надежности от стоимости.

В общем случае, как указывалось, можно рассматривать повышение надежности компонентов изделия не только за счет резервирования, но и за счет любых других мероприятий. Если компоненты сами представляют собой достаточно сложные изделия, то для каждого из них возможны десятки вариантов повышения надежности. Тогда процесс проводится в два этапа:

- 1) для каждого из компонентов строится частная оптимальная последовательность вариантов, как указано выше;
- 2) строится оптимальная последовательность для изделия в целом, при этом на каждом шаге процесса рассматривается повышение надежности изделия за счет перехода каждого компонента к следующей точке его частной оптимальной последовательности.

Очевидно, что таких этапов может быть и больше.

Следует обратить внимание на то, что построение при описанной процедуре всегда начинается с минимального, наименее надежного варианта. Заканчивать построение следует в области R_{opt} или $R(C_{opt})$ в соответствии с рис. 2.2.2.

Обратная задача. Задача определения минимальных затрат, необходимых для достижения заданной надежности, ставится в тех случаях, когда требуемая надежность уже выбрана из каких-либо соображений, например, просто по аналогии с другими изделиями. Решается эта задача очевидным образом с использованием той же оптимальной зависимости надежность — стоимость.

Распределение норм надежности между компонентами изделия. При любом выборе уровня надежности на графике $R\{C\}$ так или иначе фиксируется определенная точка, т. е. надежность и стоимость изделия в целом. Принципиальное значение имеет тот факт, что при этом фиксируются и те значения надежности и стоимости всех компонентов изделия, которые соответствуют данной точке. Очевидно, что эти значения являются оптимальными с точки зрения общих затрат на создание изделия. Их и имеет смысл задавать в ТЗ на компоненты в качестве требуемых уровней. При этом, однако, не следует каким-либо образом задавать и те способы, которыми были «обеспечены» данные уровни. В ходе разработки могут применяться совершенно другие, в том числе более эффективные, меры.

Согласно изложенному оптимальные требования к надежности изделий-компонентов должны определяться одновременно с требованиями к другим изделиям, «завязанным» совместно с ними в комплексе. Например, чтобы обоснованно предъявить требования к устройству управления станком-автоматом, описанная процедура должна быть проведена в масштабах всего станка (включая все остальные агрегаты), если задаются требования по надежности для станка; в масштабах поточной линии (включая все остальные станки и их агрегаты) — если задаются требования для линии и т. п. Чем в большем масштабе проводится эта работа, тем больше эффект от оптимального распределения норм надежности и соответствующих средств.

Все сказанное справедливо для компонентов конкретного назначения, т. е. применяющихся в одном или нескольких известных изделиях более высокого ранга. Если же изделие-компонент имеет настолько много применений, что рассмотреть их все невозможно, то оно уже должно быть отнесено к изделиям общего назначения (см. п. 2.2.2). Так, если электродвигатель разрабатывается специально для определенного станка, то требования к нему определяются после построения оптимальной зависимости и выбора требуемого уровня для данного станка. Если двигатель предназначен для нескольких станков поточной линии, то эту работу необходимо проводить в масштабах всей линии. Если же двигатель должен быть вообще типовым, унифицированным, например, для всей станкостроительной промышленности, то расширение работы до масштабов целой отрасли, очевидно, уже нереально.

Необходимо отметить, кроме того, что по мере увеличения масштабов перебора все актуальнее становится вопрос о перераспределении средств между надежностью и другими параметрами изделия. Так, для поточной линии увеличение числа станков может оказаться более выгодным, чем повышение надежности каждого из них.

2.3.2. Требуемый уровень надежности новых разработок. Изделия общего назначения

Как уже указывалось, принципиальным отличием ИОН является такое многообразие их применения, которое делает невозможным анализ всех вариантов этого применения с точки зрения влияния надежности на результат выполнения работы. Поэтому принцип *что нужно* невозможно конкретизировать при обосновании заявок к их надежности.

Иногда для ИОН можно указать такое применение, которое предъявляет самые высокие требования к его надежности. Тогда его следует рассматривать как ИКН, и задача сводится к предыдущей (п. 2.2.1). Однако в большинстве случаев и это не удастся, и тогда требования могут быть назначены только по принципу *что можно*. При этом выполняются следующие действия (см. рис. 2.2.2.).

1) Строится оптимальная последовательность вариантов изделия (она же — оптимальная зависимость $R(C)$), как указано в § 2.2.1. При малом числе вариантов достаточно рассмотрения на глаз.

2) Проверяется выполнение ограничения по затратам, т. е. решается вопрос: приемлемо ли $R(C_{opt})$ для данного изделия? Напомним, что для ИКН этот вопрос решался на основе анализа выходного эффекта изделия. Критерием для принятия решения была приемлемость или неприемлемость выходного эффекта изделия с уровнем надежности $R(C_{opt})$. Теперь мы должны применить тот же критерий, но не

прямо, а косвенно — путем сравнения рассматриваемого изделия с изделиями-аналогами, применявшимися ранее. Опыт, накопленный при работе с последними, — единственная гарантия того, что новое изделие будет иметь не слишком низкий выходной эффект, т. е. будет соответствовать и тому, *что нужно*.

3) Если ограничения позволяют сделать новое изделие не хуже существующих аналогов, то на основе интуиции и опыта (экспертный метод) выбирается требуемый уровень его надежности. Если же ограничения этого не позволяют, то задача не решается — такое изделие нет смысла разрабатывать. При этом, конечно, подразумевается, что низкая надежность не компенсируется другими параметрами изделия с точки зрения выходного эффекта.

Распределение норм между компонентами изделия производится точно так же, как и для изделий конкретного назначения.

2.3.3. Требуемый уровень надежности серийных изделий

Сопоставление с опытным образцом. Идеализируя процесс разработки изделий, можно считать, что передача новых изделий в серийное производство производится только после того, как опытный образец (образцы) изделия успешно прошел испытания по всем пунктам требований. Тогда на этапе серийного производства единственным способом обеспечения надежности является совершенствование технологии. Здесь не может быть речи о переборе вариантов резервирования, схем и т. д. Все это уже выбрано, зафиксировано в технической документации и испытано на опытном образце. Поэтому уровень надежности, задаваемый в ТУ на серийное изделие, должен соответствовать уровню опытного образца, в противном случае изделие потребует коренных переделок. Естественно, в требованиях ТУ можно и нужно учесть те доработки, которые проводятся в серийных изделиях после испытаний опытных образцов.

Практика разработки современных сложных изделий сильно отличается от изложенной идеализированной картины. Как правило, опытный образец не соответствует целому ряду требований, среди которых очень часто оказывается и надежность. Доработки проводятся и в ходе испытаний, и в ходе производства первых серийных изделий, причем они могут затрагивать и структуру, и конструкцию, и даже принцип действия отдельных компонентов. Эти доработки могут сильно менять надежность изделия как в сторону повышения, так и в сторону понижения. Сам по себе процесс доработок, безусловно, снижает надежность — зачастую одно только прекращение доработок ведет к существенному ее повышению. Тем не менее можно считать установленным, что в среднем по мере перехода от опытного образца к первому, второму и другим серийным образцам надежность повышается. К сожалению, попытки установить здесь какие-либо общие количественные закономерности пока не привели к практическим результатам.

На основании вышеизложенного можно утверждать только то, что во многих случаях не следует отождествлять уровень надежности опытного и серийных образцов. Однако никаких других позитивных рекомендаций сформулировать, по-видимому, невозможно. Таким образом, оптимальный уровень надежности серийных изделий в условиях серьезных доработок, а тем более при низкой надежности опытного образца следует определять в каждом частном случае в зависимости от конкретной ситуации. Так, в некоторых отраслях с самого начала разработки (в ТЗ) оговариваются разные уровни надежности для опытного образца, для изделий первого, второго года выпуска и т. п.

Изменение фактической надежности с помощью приемочных и браковочных уровней. Как известно, контроль надежности на испытаниях можно рассматривать как своего рода фильтр, через который проходят изделия, прежде чем попасть в эксплуатацию. Этот фильтр должен с вероятностью $1 - \beta$ (β — риск потребителя) отсекал изделия с недопустимо низкой надежностью R_1 (браковочный уровень) и с вероятностью $1 - \alpha$ (α — риск поставщика) пропускать заведомо годные изделия с уровнем надежности R_0 (приемочный уровень). По мере повышения надежности изделий вероятность их приемки (оперативная характеристика плана) возрастает

Легко видеть, что если на вход такого фильтра с производства поступают изделия с различной надежностью, то на его выходе распределение уровней надежности будет смещено в сторону лучших значений R . Ничего более решительного от испытаний ожидать не приходится, поэтому при большом количестве плохих и средних изделий, выпускаемых производством, к потребителю неизбежно попадут

и средние и даже плохие изделия, хотя и в меньшем количестве. За низкую надежность изготовитель штрафует большим процентом забракованных изделий, и существует мнение, что это заставит его выпускать изделия с уровнем порядка R_0 и выше. На основании этого мнения широко распространилась традиция отождествлять на испытаниях R_0 с $R_{мреб}$, т. е. весь допуск от R_0 до R_1 на контролируемый показатель смещать в сторону снижения надежности. .

Однако, стремясь всемерно сократить объем испытаний, промышленность вынуждена зачастую принимать очень большой допуск: отношение $R_0/R_1 = 2...3$ для T и отношение $(1 - R_1)/(1 - R_0) = 2... 5$ для вероятностных показателей являются обычными для современных изделий. При этом довольно существенные отклонения от R_0 в худшую сторону сопровождаются сравнительно небольшим возрастанием вероятности бракования. Кроме того, часто применяют различные меры, уменьшающие этот штраф: например, повторное и многократное предъявление на испытания забракованных изделий. В результате отождествления R_0 и $R_{мреб}$ потребители в этих случаях получают изделия с значительно меньшей надежностью, чем $R_{мреб}$, указанное в технической документации, и это является одной из самых распространенных причин недостаточной надежности промышленных изделий.

Выходом из положения, очевидно, является расположение R_0 и R_1 по обе стороны от заданного значения $R_{мреб}$, чтобы поле допуска создавалось за счет интересов и потребителя, и поставщика. Строгая теория размещения R_0 и R_1 пока отсутствует; по-видимому, она должна учитывать величину ущерба от ошибочных решений на испытаниях и все особенности правил приемки типа повторных испытаний. Однако решение этой задачи даже «экспертным» методом является эффективным средством повышения фактической надежности изделий, а точнее — приближением ее к заданным значениям.

Важно отметить, что переход от поля допуска $[R_1, R_{мреб}]$ к более широкому $[R_1, R_0]$ только за счет увеличения R_0 ведет к сокращению объема испытаний. Повышение R_0 , увеличивающее объем, здесь влияет меньше, чем снижение точности контроля.

Размещение поля допуска по обе стороны от заданного значения приводит к очень интересному и важному положению. Из материалов раздела 4 следует, что при планировании испытаний на надежность одноступенчатым методом оценочный норматив C лежит между R_0 и R_1 . По-видимому, всегда можно так подобрать R_0 и R_1 , чтобы C совпал с $R_{мреб}$, и тогда условием приемки будет $R^* > R_{мреб}$, а условием браковки $R^* < R_{мреб}$ (R^* — точечная оценка показателя R , полученная на испытаниях). Если пойти по этому пути дальше, то можно не задавать R_0 и R_1 , ограничившись сознанием того, что они лежат по обе стороны от $R_{мреб}$. Очевидно, при большом объеме испытаний, когда точность и достоверность оценки заведомо обеспечиваются, указанный подход вполне приемлем. Таким образом, давно интуитивно принимаемый практиками «контроль по среднему» оказывается правильным и получает достаточно строгое обоснование. Для частных случаев в [1] показано, как рассчитать уровни R_0 и R_1 таким образом, чтобы обеспечить равенство $C = R_{мреб}$ при конечном объеме испытаний (и заданных рисках).

2.4. ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 2

Подводя итоги, мы приходим к ряду неутешительных выводов. Главный из них состоит в том, что при обосновании численных значений нормируемых показателей надежности существенную, а в большинстве случаев даже решающую роль играет интуиция и опыт специалистов. Относительно строгое решение проблемы существует только для ИКН при условии, что эффект от применения изделия и ограничивающие факторы могут быть измерены в одних и тех же единицах (обычно в рублях). Построение оптимальной зависимости надежность — стоимость (доминирующей последовательности вариантов построения изделия), необходимое в этом случае и желательное в остальных, требует знания слишком многих подробностей о будущем изделии — возможных вариантов структуры, надежности составных частей, системы контроля и т. п. На этапе обоснования заявок к изделию, когда разработка еще не началась, все это можно знать лишь очень и очень приближенно.

К сожалению, причиной такого положения является не слабость теории надежности, а сама суть проблемы. Это означает, что и в будущем нет оснований ожидать здесь радикальных решений. Поэтому следует оставить иллюзии о строгом обосновании требований к изделию перед началом разработки, а ориентироваться на их последовательное уточнение и корректировку по мере получения новой информации. Такой информацией являются прежде всего экспериментальные данные о результатах применения изделия и его надежности, полученные на различных этапах испытаний.

Из материалов главы следует также вывод о том, какое большое значение при задании заявок имеет информация по изделиям-аналогам. Это еще раз подчеркивает необходимость систематического сбора и анализа статистических данных по надежности с мест испытаний и эксплуатации изделий, выпускаемых промышленностью.

3. РАСЧЕТ НАДЕЖНОСТИ

Предположения: поток отказов простейший, все распределения экспоненциальные.
Интенсивность отказов постоянна (2-й участок на графике функции $\lambda(t)$, рис 1.4.4).

3.1. РАСЧЕТ НАДЕЖНОСТИ ИЗДЕЛИЙ ВИДА I

3.1.1. Невосстснавливаемые изделия

Составление схемы расчета надежности системы. Структура системы изображается в виде специальной логической схемы СхН*), характеризующей состояние (работоспособное или неработоспособное) системы в зависимости от состояний отдельных элементов. На этом этапе рассматривается поведение системы при отказе каждого из составляющих ее элементов. Иногда при отказе одного элемента отказывает вся система. Возможны случаи, когда система продолжает работать при определенной комбинации работоспособных и неисправных элементов. Чаще других применяют три способа соединений элементов (рис. 3.1.1):

- а) последовательное (основное) соединение - при отказе элемента отказывает вся система;
- б) параллельное нагруженное и в) параллельное ненагруженное соединения - система сохраняет работоспособность, пока работоспособен хотя бы один элемент из группы;
- г) скользящее резервирование - один (возможно, один из нескольких) резервный элемент может заменить любой из основных; система работоспособна, пока не откажет весь резерв плюс ещё один элемент. Здесь резерв тоже может быть нагруженным в разной степени.

Напомним, что в СхН не учитываются параметры контроля и переключения (перехода) на резерв, они во всех случаях учитываются расчетными формулами.

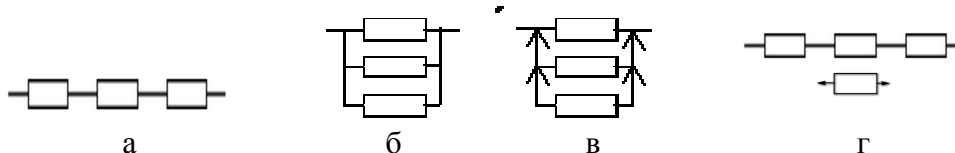


Рис.3.1.1

После составления схемы находят и уточняют значения показателей надежности элементов и затем вычисляют значение показателя надежности системы. Рассмотрим содержание каждой из этих операций.

В общем случае выделяются подсистемы (блоки), в которых при отказе хотя бы одного элемента отказывает весь блок. Для каждого такого блока расчет показателей надежности ведется, как описано ниже. Каждый из выделенных блоков так или иначе обозначается, затем перечисляются комбинации блоков, обеспечивающие безотказную работу системы. При составлении СхН необходимо подробно анализировать последствия, к которым приводит отказ элемента.

Рассмотрим пример. Пусть на общую сеть работают два генератора мощностью P каждый. Тогда возможны несколько случаев поведения этой схемы при отказах:

- а) Обязательно требуется полная мощность $2P$, снижение мощности или двойная перегрузка генератора (при отказе одного из них) недопустимы, это отказ системы. Тогда генераторы соединяются на СхН последовательно.
- б) При отказе одного из генераторов можно отключить маловажные потребители энергии, чтобы нагрузка на оставшийся генератор по-прежнему была допустимой (у генератора может быть и некоторый запас мощности); генераторы соединяются на СхН параллельно.

*) Такое сокращение принято, чтобы сохранить стиль ЕСКД, где СхЭ означает «схема электрическая», а СхМ — схема монтажная.

в) при отказе одного из генераторов оставшийся работает со значительной перегрузкой, при этом его надёжность ниже, чем в номинальном режиме. На СхН генераторы соединяются параллельно, но применяются более сложные формулы.

Расчёт надёжности блоков схемы. Вначале необходимо определить число элементов каждого типа в блоках рассматриваемого варианта системы. Затем нужно разыскать в справочных материалах значения показателей надёжности элементов - средние интенсивности отказов.

Расчетные формулы для наиболее распространённых случаев приведены ниже.

Интенсивность отказов последовательного соединения из n элементов без резерва λ_c (это относится к расчёту ячеек, блоков и систем) определяется суммированием:

$$\lambda_c = \sum_{j=1}^n \lambda_j$$

где λ_j - интенсивность отказов j -го элемента. Это основная формула для надёжности блока. Средняя наработка на отказ (до отказа):

$$T = 1/\lambda_c$$

Вероятность безотказной работы последовательного соединения равна произведению вероятностей безотказной работы элементов:

$$P_c(t) = \prod_{j=1}^n P_j(t)$$

Отдельная проблема – исходные данные по элементам λ_j . Значения интенсивности отказов одноименных элементов могут иметь значительный разброс. Здесь играют большую роль качество элемента и условия его применения, а также количество и качество информации об отказах. Для оборонных предприятий издаётся специальный справочник, постоянно пополняемый и корректируемый, но закрытый. Можно воспользоваться американским справочником [4], также труднодоступным; но этот справочник может быть ближе к современным разработкам, т.к. в них всё чаще применяются импортные элементы.

Для каждого элемента следует учесть нагрузку – этим термином обычно обозначают режим использования элемента, включающий электрическую нагрузку, температуру и т.п. От режима надёжность элемента может зависеть существенно, поэтому в справочниках обычно приводятся такие зависимости. Для разных типов элементов влияние разных факторов также различно. Для резисторов интенсивность отказов определяется прежде всего рассеиваемой мощностью; для конденсаторов - напряжением, и т.д. Нагрузка в расчёте учитывается так называемым «коэффициентом нагрузки» K_n , который домножается на λ_{j0} – интенсивность отказов элемента в номинальном (т.е. предельном) режиме. Одно время в оборонной промышленности было обязательным составление отдельного документа - карты режимов для каждого блока, ячейки и проч. Проверкой и контролем карт режимов занимались специальные группы.

Обязательно следует включать в число элементов электрические соединения (пайкой, сжатием, сваркой), а также другие виды контактов (штепсельные и пр.). Обычно на электрические соединения приходится 10—50% общего числа отказов.

Коэффициентный способ расчёта применяется, когда имеется достоверное значение интенсивности отказов лишь одного элемента системы. Предполагается, что при различных режимах работы справедливо соотношение

$$\frac{\lambda_j}{\lambda_0} = k_1$$

где λ_i – интенсивность отказов рассматриваемого элемента; λ_0 – достоверно известная интенсивность отказов одного элемента (основного элемента расчета). Для примера значения коэффициентов k_i , найденные путем анализа данных по интенсивностям отказов различных элементов, приведены в табл.3.1.1. При вычислении этих коэффициентов за основной элемент расчета были приняты резисторы.

Таблица 3.1.1

Наименование элементов	$k_{i\text{мин}}$	$k_{i\text{макс}}$	Наименование элементов	$k_{i\text{мин}}$	$k_{i\text{макс}}$
Электровакуумные приборы	18,3	26,6	Селеновые и купроксные выпрямители	16,7	20
Генераторные лампы	70	77	Электродвигатели	17	22
Конденсаторы	0,33	0,61	Преобразователи	3,3	5,5
Резисторы	1	1	Гироскопы	97,5	100
Потенциометры	7,2	12		10,7	15,3
Диоды	11,2	15,4			

Для получения значений интенсивностей отказов элементов системы необходимо значение λ_0 интенсивности отказов основного элемента расчета (в данном случае резистора) умножить на соответствующее значение коэффициента k_i .

Надёжность системы. Применение формулы полной вероятности. Учитываются гипотезы H_1, H_2, \dots, H_n – несовместимые события, образующие полную группу. Вместе с одним из этих событий может произойти рассматриваемое событие X — безотказная работа системы в течение заданной наработки $(0, t)$. Вероятность появления события X равна сумме произведений вероятности каждой гипотезы $P(H_j)$ на условную вероятность $P(X|H_j)$ события при этой гипотезе:

$$P(X) = \sum_{j=1}^n P(H_j)P(X|H_j)$$

Для расчета выбирается определенная группа элементов логической схемы, и формируются гипотезы о том, что может произойти с этой группой элементов в течение заданной наработки. В каждой из гипотез предполагается, что для любого элемента группы возможными исходами являются либо безотказная работа, либо отказ.

При вычислении условной вероятности безотказной работы системы $P(X/H_j)$ при гипотезе H_j предполагается, что произошли соответствующие события (безотказная работа или отказ одного или нескольких элементов) и рассматриваются соответствующие схемы.

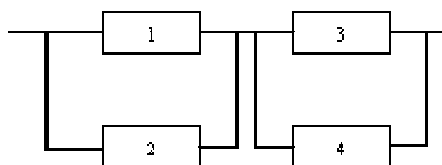


Рис. 3.1.2

В качестве примера применения формулы полной вероятности рассмотрим расчет надежности системы, СхН которой приведена на рис.3.1.2. Известно, что элементы не восстанавливаются, система контроля и переключения идеальна. Рассмотрим группу из первого и третьего элементов. Здесь возможны четыре гипотезы о состояниях элементов: оба элемента остались работоспособными; первый элемент отказал, второй остался работоспособным; первый элемент остался работоспособным, третий отказал; оба элемента отказали. Гипотезы (кроме последней) и их вероятности приведены в табл. 3.1.2.

Таблица 3.1.2

Гипотеза	состояние элементов		Вероятность гипотезы $P(H_j)$	$P(X H_j)$ - условная вероятность безотказной работы системы при гипотезе H_j
	№1	№3		
H_1	работает	работает	$p_1 p_3$	1
H_2	отказал	работает	$(1 - p_1) p_3$	p_2
H_3	работает	отказал	$p_1 (1 - p_3)$	p_4
H_4	отказал	отказал	$(1 - p_1) (1 - p_3)$	$p_2 p_4$

Подставив выражения для $P(H_j)$ и $P(X|H_j)$ в формулу $P(X)$, получим после преобразований:

$$p_c = p_1 p_3 + (1 - p_1) p_3 p_2 + p_1 (1 - p_3) p_4 + (1 - p_1) (1 - p_3) p_2 p_4$$

Отметим, что в данном простом примере эта формула может быть получена терпеливым перебором состояний системы и суммированием вероятностей работоспособных состояний - когда работает одно устройство из первой пары (№1 или №2), и одно из второй (№3 или №4).

Применение графа состояний. Целесообразно выделить типовые структуры графа состояний, соответствующие типовым соединениям на СхН. Такие типовые структуры приведены в табл. 3.1.3. Для перехода к графам состояний аналогичных восстанавливаемых систем необходимо в графах состояний таблицы добавить встречные стрелки с интенсивностями восстановлений элементов.

В табл. 3.1.3 номера состояний обозначены кодом, в котором число знаков равно числу элементов, место знака соответствует номеру элемента, 1 обозначает работоспособное состояние, 0 обозначает неработоспособное состояние элемента.


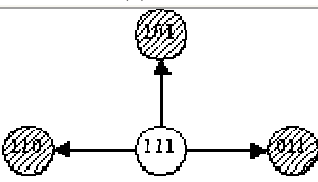
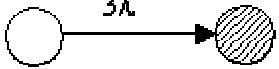
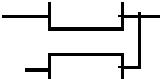
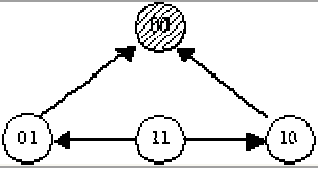

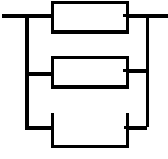
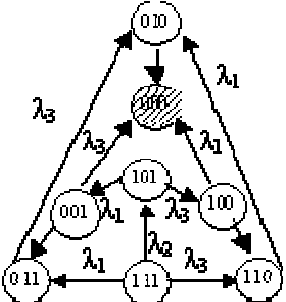
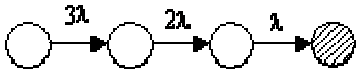
При равнонадежных элементах соответствующие графы состояний становятся проще.

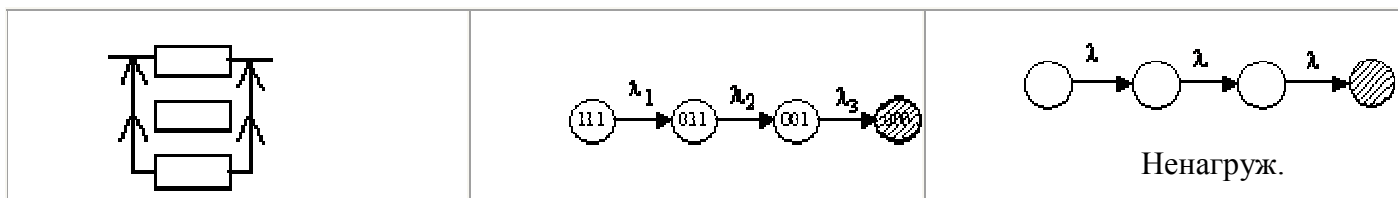
Переход от логической схемы расчета надежности к графу состояний целесообразно осуществлять в следующем порядке.

1. В логической схеме расчета надежности выделяют соединения последовательно-параллельные (нагруженные) и параллельные ненагруженные, объединив элементы в соответствующие подсистемы.

2. Строят граф состояний последовательно-параллельной подсистемы, начиная с состояния, соответствующего работоспособности всех элементов.

Таблица 3.1.3 (заштрихованы неработоспособные состояния).

Тип соединения на схеме расчета надежности	Графы состояний системы	
	При элементах различной надежности	При равнонадежных элементах
		
		
		 Нагруж.



Каждое следующее состояние получается из предыдущего путем применения следующих правил:

- все неработоспособные для данной подсистемы состояния являются конечными (из них нет возврата, т.к. система не восстанавливается);
- все работоспособные для данной подсистемы состояния являются промежуточными; каждому промежуточному i -му состоянию соответствует ряд следующих состояний, различающихся неработоспособностью одного из элементов, бывших работоспособными при i -м состоянии системы;
- новые состояния добавляются до «упора» в конечное;
- одинаковые состояния (т. е. совпадающие по состояниям элементов) объединяются.

3. По данным правилам строят графы состояний отдельно для нагруженных (работающих) подсистем и подсистем, находящихся в ненагруженном резерве.

4. Конечные состояния графа состояний нагруженной (работающей) подсистемы являются начальными вершинами графа состояний для подсистемы, находящейся в ненагруженном резерве. К каждой из этих вершин необходимо подсоединить граф состояний ненагруженного резерва.

На рис. 3.1.3 приведен пример логической схемы расчета надежности и соответствующего ей графа состояний.

Логико-вероятностный метод расчета надежности систем

Такое условное название получил метод расчета надежности систем, при котором математическая модель системы описывается с помощью функций алгебры логики (ФАЛ), т. е. функций, принимающих лишь два значения ($y=1$ или $y=0$) и наборами двоичных аргументов, x_1, x_2, \dots, x_n для элементов системы, которые также могут находиться лишь в двух состояниях ($x_j = 1$ или $x_j=0$).

Символы x_1, x_2, \dots, x_n характеризуют состояния элементов, причем $x_j=1$ соответствует работоспособности элемента, $x_j = 0$ соответствует его неработоспособности. Аналогично понимают символы $y=1, y = 0$ для системы.

Функцию алгебры логики, связывающую состояния элементов с состоянием системы, называют функцией работоспособности системы. Эту функцию составляют путем анализа физических особенностей работы системы.

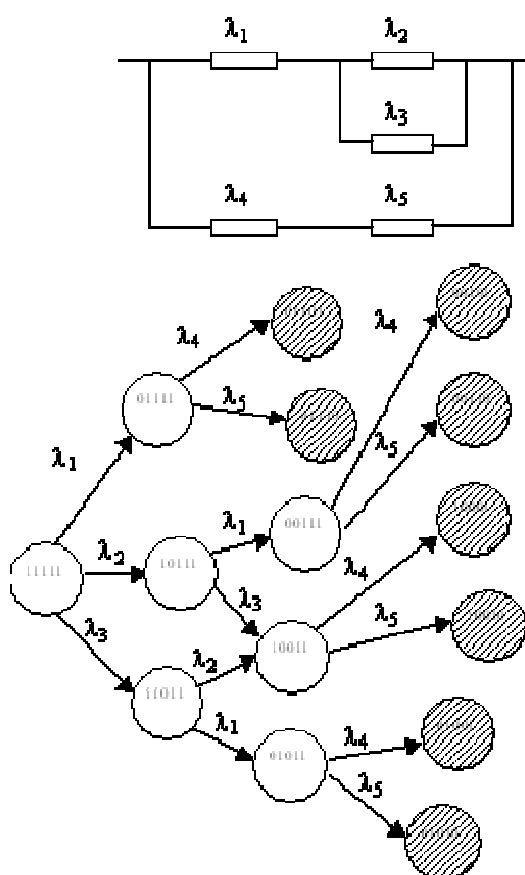


Рис. 3.1.3

От логической функции работоспособности переходят к уравнению работоспособности в символах обычной алгебры. При этом конъюнкциям и дизъюнкциям соответствуют определённые формулы, которые мы здесь не приводим.

Например, для системы из трех элементов, логическая схема которой изображена в 3й строке таблицы 3.1.3 (нагруженное резервирование), функция работоспособности имеет вид:

$y = x_1 \vee x_2 \vee x_3$, где 1, 2, 3 — номера элементов, а \vee — оператор конъюнкции. Уравнение работоспособности в символах обычной алгебры:

$$y = x_1 + x_2 + x_3 - (x_1x_2 + x_1x_3 + x_2x_3) + x_1x_2x_3.$$

Выражение для вероятности безотказной работы:

$$p_c = p_1 + p_2 + p_3 - (p_1p_2 + p_1p_3 + p_2p_3) + p_1p_2p_3.$$

Интересно, что то же самое можно получить сразу по логической схеме расчета надежности:

$$p_c = 1 - (1 - p_1)(1 - p_2)(1 - p_3) = p_1 + p_2 + p_3 - (p_1p_2 + p_1p_3 + p_2p_3) + p_1p_2p_3.$$

Логико-вероятностный метод расчета можно применять при любой структуре системы (не только при последовательно-параллельных логических схемах) и при любых распределениях наработки до отказа. Однако не всегда удастся составить логическую функцию работоспособности, достаточно точно соответствующую рассматриваемой системе; кроме того, для сложных систем преобразования ФАЛ становятся очень громоздкими.

3.2.2. Восстанавливаемые изделия

Общий метод вывода расчётных формул. Известно, что если все потоки событий, переводящие систему из состояния в состояние, являются пуассоновскими, то случайный процесс, протекающий в системе, будет называться марковским с непрерывным временем; и наоборот, если процесс, протекающий в системе, является марковским с непрерывным временем, то все потоки событий, переводящие систему из состояния в состояние, являются пуассоновскими. Эти закономерности широко используются при выводе формул расчёта показателей надёжности. Следует заметить, что предположение об экспоненциальности распределений не всегда оправдано. Особенно это относится к распределениям времени восстановления. Однако если в среднем наработка до отказа элементов значительно больше времени восстановления, то большинство показателей надежности не зависят от вида распределения времени восстановления.

Принцип решения задачи. Если известно словесное описание структуры и принципа функционирования и восстановления работоспособности системы, то можно определить множество всех возможных состояний системы. Можно построить граф переходов, вершинами которого будут возможные состояния системы, а ребрами — возможные переходы в другие состояния. Интенсивности переходов определяются соответствующими характеристиками безотказности и ремонтпригодности элементов. Заметим, что не все переходы могут быть разрешены. Все ограничения на граф переходов содержатся в словесном описании принципа функционирования и восстановления системы.

На основании построенного графа переходов записывается система дифференциальных уравнений (число уравнений равно числу состояний). Задав определенный критерий отказа, все состояния можно разделить на две области: работоспособности и отказа системы. К системе уравнений применяется преобразование Лапласа, и получается система алгебраических уравнений. Такая система в свою очередь решается с использованием правила Крамера (через определители), после чего проводится обратное преобразование Лапласа [7]. Целью всего этого является определение показателей: вероятности безотказной работы $P(tp)$ - как вероятности пребывания системы в области работоспособности в течение времени работы tp ; коэффициента готовности - как доли времени пребывания системы в области работоспособности, и т.д.

Вывод формул – достаточно длительная процедура, которая здесь не рассматривается, так как сами формулы приведены во многих книгах (например, в том же справочнике [7]).

Пример построения графа. Рассмотрим восстанавливаемую дублированную систему, состоящую из разнонадежных элементов, интенсивности отказов и восстановления которых соответственно равны $\lambda_1, \lambda_2, \mu_1, \mu_2$. Обозначим H_0 — состояние системы, в котором отказавших элементов нет; H_1 и H_2 — состояния, в которых один (первый или второй) элемент является отказавшим; H_{12} — состояние, в котором оба элемента отказали. Граф представлен на рис. 3.1.4.

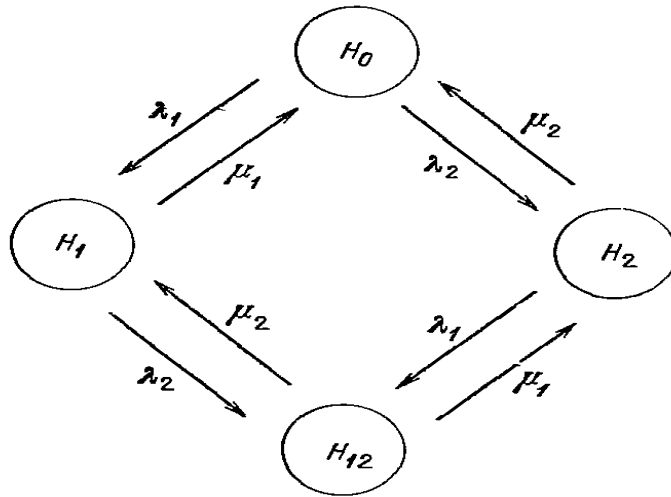


Рис. 3.1.4

Процессы гибели и размножения. Для многих систем граф состояний переходов может иметь следующий вид (рис. 3.1.5):

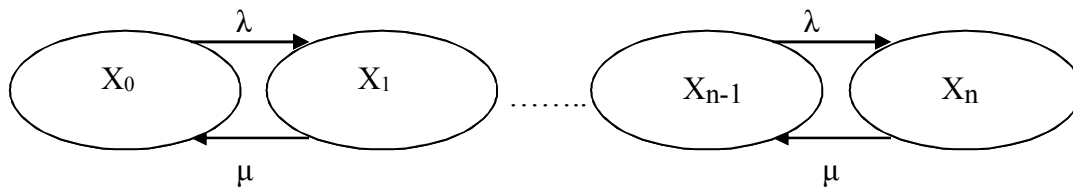


Рис. 3.1.5

Из любого состояния X_k (кроме крайних) возможен переход только в два соседних с ним состояния: предыдущее и последующее. Такие процессы принято называть «процессами гибели и размножения». Данное название они получили потому, что впервые были применены в биологии для анализа численности популяций, распространения эпидемий и при исследовании других проблем. Так, например, если считать, что состояние X_k соответствует численности популяции, равной k , то переход системы в состояние X_{k+1} происходит при рождении одного члена популяции, а переход в обратном направлении – при гибели одного члена популяции.

Поведение такой системы описывается системой дифференциальных уравнений, которые составляются так: слева записывается производная вероятности состояния $P_k(t)$ по времени, справа – сумма трёх произведений: вероятность k -го состояния умножается на интенсивность перехода в нижестоящее (отказ ещё одного устройства) и в вышестоящее (восстановление отказавшего устройства) состояния, а вероятности $k-1$ и $k+1$ состояний на интенсивности отказов и восстановлений соответственно.

$$\frac{dP_k(t)}{dt} = -(\lambda_k + \mu_k)P_k(t) + \lambda_{k-1}P_{k-1}(t) + \mu_{k+1}P_{k+1}(t)$$

Примерно так же составляется система уравнений для других случаев. Вариантов очень много, поскольку на вид формулы влияет множество факторов: так, последовательная система при отказе любого элемента может выключаться (тогда новые отказы во время ремонта отказавшего элемента возникнуть не могут), восстановление может быть неограниченное или ограниченное (т.е. ремонтная бригада одна на всю систему), и т.п. В системах с резервом факторов ещё больше (см. ниже).

Восстанавливаемые резервированные системы различной кратности с неидеальными параметрами контроля и переключения. В современных сложных изделиях все чаще встречается такое резервирование, когда все факторы, оказывающие наибольшее влияние на надежность резервированной

системы, присутствуют одновременно (пренебречь ничем нельзя). Это прежде всего кратность резервирования, параметры переключения на резерв, нагруженность резерва, параметры контроля основных и резервных устройств. Эти факторы влияют на надежность системы значительно сильнее, чем λ и μ .

Система из k основных и одного резервного элемента (резерв облегченный). Ниже приводится формула, одновременно учитывающая максимальное (на сегодняшний день) число существенных факторов, еще пригодная для инженерных расчетов без применения ЭВМ (может быть использован EXEL).

Формула относится к группе из n основных и одного резервного устройства (резерв скользящий). Устройства восстанавливаются, но не более m устройств одновременно ($m \leq n$). Считается, что с вероятностью ν отказ основного элемента обнаруживается, переключатель оказывается исправным и срабатывает достаточно оперативно, причем все переходные процессы заканчиваются за допустимое время. С вероятностью $1 - \nu$ при переходе имеет место отказ группы (из-за задержки в обнаружении, в срабатывании переключателя и т. п.), время существования которого (с момента окончания допустимого времени до окончания переходных процессов) распределено по экспоненциальному закону со средним временем $\tau_{пер}$.

Отказ резервного устройства с вероятностью η обнаруживается мгновенно; с вероятностью $1 - \eta$ обнаружение отказа задерживается на время, распределенное по экспоненциальному закону со средним значением τ_k . Распределения наработки между отказами и времени восстановления экспоненциальные. Интенсивность отказов основных устройств λ , резервного $k\lambda$ ($k \leq 1$, это общий случай), интенсивность восстановлений μ . Предполагается, что необнаруженный отказ, возникший в резерве, наверняка обнаружится в случае возникновения там же другого, обнаруженного отказа. В отказавших устройствах во время ремонта новых отказов не возникает. Последнее предположение кажется натянутым: обслуживающий персонал нередко вызывает при ремонте дополнительные отказы, а радиоэлектронные устройства, например, при ремонте почти не выключаются (поиск неисправности, регулировка). Однако если при сборе статистики в качестве времени восстановления фиксировать суммарное время, затраченное на все без исключения операции по ремонту — от прекращения работы до ее возобновления, то такой подход является единственно правильным. Величины η и τ_k характеризуют два вида контроля резерва: непрерывного неполного контроля с глубиной η и периодического полного со случайным периодом (среднее значение периода контроля τ_k). Если периодический контроль тоже неполный с глубиной $\eta_k < 1$, то все формулы справедливы при делении τ_k на величину η_k .

Возможность отказов исправных устройств во время отказа группы (они считаются включенными, что характерно для современных изделий) в формуле учитывается.

Вычисляются коэффициент готовности K_2 , наработка на отказ T и среднее время восстановления группы $T_в$. Считается, что после отказа группа начинает работать, как только в ее составе наберется n устройств (т.е. в начале каждого интервала безотказной работы весь резерв ещё неработоспособен). Для сокращения объема вычислений рекомендуется подставлять в приведенные ниже формулы численные значения $A_1 \dots, A_5$, не раскрывая предварительно выражений для этих коэффициентов.

$$K_2 = \frac{1 + A_1 + A_2}{1 + A_1 + A_2 + n(A_2 + A_4 + A_5)} ; \quad T = \frac{1 + A_1 + A_2}{n\lambda(1 - \nu + A_1 + A_2)} ,$$

$$\text{где} \quad A_1 = \frac{(n + k\lambda)}{\mu} ; \quad A_2 = \frac{(1 - \eta)k\lambda\tau_k}{1 + (n + \eta k)\lambda\tau_k} ;$$

$$A_3 = \frac{(1 - \nu)\lambda\tau_{пер}}{1 + k\tau_{пер}} ; \quad A_4 = \frac{((1 - \nu)A_2 + (1 - \eta)kA_3)\lambda\tau_k\tau_{пер}}{\tau_k + \tau_{пер} + \eta k\lambda\tau_k\tau_{пер}} ; \quad A_5 = \frac{(A_1 + A_2 + kA_3)\lambda}{m\mu} ;$$

$$T_в = \frac{(1 - K_2)T}{A_3 + A_4 + A_5} = \frac{(1 - K_2)T}{A_3 + A_4 + A_5} , \quad P(t) = e^{-t/T} , \quad K_{ог} = K_2 P(t).$$

$$K_2 \quad \lambda(1 - \nu + A1 + A2)$$

Для дубля ($k = 1$) без периодического контроля ($\tau_k = \infty$): $T = 1/[\lambda(1 - (1+\eta)(\nu/2 - \lambda/\mu))]$.

Система из k основных и n резервных элементов. Предполагается, что все элементы ремонтируются независимо, т. е. восстановление неограниченное. Все резервные элементы занумерованы, при отказе одного из основных элементов он «меняется местами» с тем резервным, который имеет наименьший номер среди всех резервных, не ремонтируемых в данный момент. Считается, что $\lambda \ll \mu$. Вычисления проводятся в виде рекуррентной процедуры (повторяются n раз по числу резервных элементов). Вычисляются отдельные параметры двух потоков событий, нарушающих работоспособность системы: потока отказов из-за сбоев — неудачного перехода на резерв в случае отказа одного из основных элементов и наличия исправного резерва — и потока устойчивых отказов из-за совпадения отказов более чем n элементов.

Частные случаи. Ниже приводятся формулы для простых структур. Везде предполагается неограниченное восстановление, все законы пуассоновские, отказы обнаруживаются сразу.

а) Для одного устройства (без резерва):

$$K_2 = T/(T+T_0) = \mu/(\lambda+\mu); \quad P(t) = e^{-(t/T)}.$$

б) Для последовательной системы из n разных устройств без резерва (i – индекс устройства):

$$K_2 = \prod_i^n K_{2i}, \quad P(t) = \prod_i^n P_i(t).$$

в) Для группы из 2-х идентичных устройств (основное и дублирующее):

резерв идеальный, нагруженный: $T_0 \cong T^2/2T_0$; $K_2 = 1 - (\lambda/\mu)^2$;

то же, но резерв ненагруженный: $T_0 \cong T^2/T_0$; $K_2 = 1 - 0,5(\lambda/\mu)^2$;

и в обоих случаях $P(t) = e^{-(t/T_0)}$, где 0 – индекс группы.

3.3 РАСЧЕТ НАДЕЖНОСТИ ИЗДЕЛИЙ ВИДА II

3.3.1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

В данной части лекций, прежде всего, конечно, будет рассмотрен расчёт $K_{эф}$. Методы, о которых здесь пойдёт речь, предназначены, во-первых, для учёта влияния надёжности на эффективность, что главным образом и отличает $K_{эф}$ от других показателей, и, во-вторых, для учёта частичных отказов, которые отличают изделия вида II от изделий вида I.

Поскольку расчету классических ПН для изделий вида I посвящена обширная литература, в лекциях такой расчет рассматривается бегло (см. выше); считается, что эти ПН при необходимости заведомо можно определить с учетом всех необходимых факторов. Напомним, что на испытаниях, когда расчет $K_{эф}$ нужен для оценки надежности изделия с помощью РЭМ, упомянутые ПН (или часть из них) определяются экспериментально.

Будем считать, что расчет начинается, как обычно, с составления схемы расчета надежности (СхН), элементы которой максимально укрупнены. Там, где нет специальных оговорок, предполагается, что элементы СхН являются изделиями вида I, что влечет за собой необходимость «дробить» изделие на достаточно мелкие компоненты. Вопрос о том, нельзя ли допустить среди элементов СхН изделия вида II и при этом учесть в расчете их частичные отказы, тесно связан с другим вопросом: если изделие является только частью некоторой системы, то можно ли использовать его $K_{эф}$ в расчете $K_{эф}$ системы? То, что известно об этом на сегодняшний день, сообщается по ходу изложения.

Ранее уже отмечалось, что показателями эффективности изделий являются усредненные величины. Соответственно и методы расчета $K_{эф}$ сводятся к тем или иным усреднениям. Далее рассматриваются те методы, которые можно считать достаточно общими, проверенными на практике, и рекомендовать к широкому применению. Помимо них, естественно, существуют и другие методы, предназначенные для оценки $K_{эф}$ тех или иных конкретных изделий. В качестве примера можно привести очень подробный и квалифицированный расчет $K_{эф}$ (под другим названием) АСУ разделением изотопных смесей [8].

Во всех случаях работа изделия рассматривается на интервале его применения длительностью tp , так как именно на этом интервале создается тот или иной положительный эффект. Однако начальное состояние изделия определяется предыдущим периодом (ожидание применения, подготовка и т. л.). Поэтому там, где в формулы входят какие-либо характеристики начального состояния, предполагается, что они вычислены с учетом всех особенностей этого периода. В число таких особенностей входит и возможная корреляция начала работы с отказами (задержка начала работы до устранения отказов, исключение из работы неисправных изделий и т. п.).

Говоря о расчетах эффективности с учетом надежности, мы будем использовать, в частности, результаты, полученные И.А.Ушаковым, например [7]. Как уже указывалось, его работы посвящены оценке абсолютных значений эффективности E , а не оценке $K_{эф}$. В то же время предлагаемые в них методы позволяют учесть в оценке только одну надежность в предположении, что учет остальных факторов — задача решенная. Поэтому для оценки эффективности изделий E этих методов совершенно недостаточно, но для оценки $K_{эф}$ — после естественной замены ряда абсолютных значений относительными — они очень полезны. С учетом этого они здесь и приводятся, а в примерах показано, насколько облегчает работу такая замена.

Вслед за И.А.Ушаковым будем называть изделиями кратковременного действия те изделия, которые на интервале применения сохраняют начальное состояние с вероятностью, близкой к 1. Остальные изделия будем называть изделиями длительного действия.

3.3.2. Усреднение по траекториям

Суть метода. Запишем выражение для показателя эффективности изделия $E(g)$ для случая, когда на интервале работы tp реализуется некоторая траектория g (используем понятия и обозначения из п. 2.1). Оно определяется усреднением значений выходного эффекта $\varepsilon(\omega, g)$ по всем возможным на данной траектории реализациям ненадежных факторов ω (множество этих реализаций обозначим через Ω_g):

$$E(g) = \int_{\Omega_g} \varepsilon(\omega, g) dQ(\omega, g) \quad (3.3.2.1)$$

где $dQ(\omega, g)$ — элемент вероятности определенной реализации факторов $\omega \in \Omega_g$.

Чтобы вычислить эффективность изделия с учетом отказов (E), интеграл (3.3.2.1) следует усреднить еще раз, теперь уже по всем возможным траекториям $g \in G$:

$$E = \iint_{G \Omega_g} \varepsilon(\omega, g) dQ(\omega, g) dP(g), \quad (3.3.2.2)$$

где $dP(g)$ — элемент вероятности реализации траектории g .

Исходное выражение для $K\text{эф}$ можно преобразовать теперь так:

$$K\text{эф} = E/E_0 = E/E(g_0) = \int E(g)/E(g_0) * dP(g) = \int W(g) dP(g), \quad (3.3.2.3)$$

где $W(g)$ — относительная эффективность g -й траектории, часто называемая весовым коэффициентом или просто весом траектории.

Формула (3.3.2.3) и является практической расчетной формулой для вычисления $K\text{эф}$.

Что касается весов $W(g)$, то они должны быть заданы как функционалы формы траекторий. Эта задача столь тесно связана с особенностями функционирования изделия, что сформулировать какие-либо общие рекомендации затруднительно. Следует отметить лишь, что для определения $W(g)$, как правило, не требуется вычислять отдельно $E(g)$ и $E(g_0)$, а удастся определять непосредственно их отношение. Пример такого изделия приведен ниже. Кроме того, при оценке весов для траекторий могут быть полезными указания по оценке весов для состояний (т. е. для траекторий, характеризующихся сохранением одного состояния в течение всего времени работы) — см. п. 3.3.3.

Область применения метода. Можно сказать, что усреднение по траекториям является наиболее общим методом расчета $K\text{эф}$, который принципиально не ограничивается ни особенностями изделия, ни видом показателя эффективности. Тем не менее область его применения сравнительно узка, что связано с большой трудоемкостью составления и вычисления функционалов $W(g)$ и интеграла (3.3.2.3). На практике этот метод удастся применять для изделий, состоящих из нескольких немногих компонентов и притом без восстановления. Последнее связано с тем, что процесс отказов для каждого невосстанавливаемого компонента описывается всего одним параметром — моментом отказа. При этих условиях кратность интеграла (3.3.2.3) равна числу компонентов [10].

Однако ценность (3.3.2.3) состоит еще и в том, что из этого общего выражения можно получать более удобные формулы для частных случаев, т. е. для тех или иных видов зависимости $E(g)$.

Учет частичных отказов подсистем и устройств невозможен без их дальнейшего дробления, причем каждый их компонент должен самостоятельно учитываться в расчете изделия в целом. Практически это нереально.

Пример 3.3.2.1. Рассмотрим систему из двух одинаковых видеокамер, предназначенную для фо

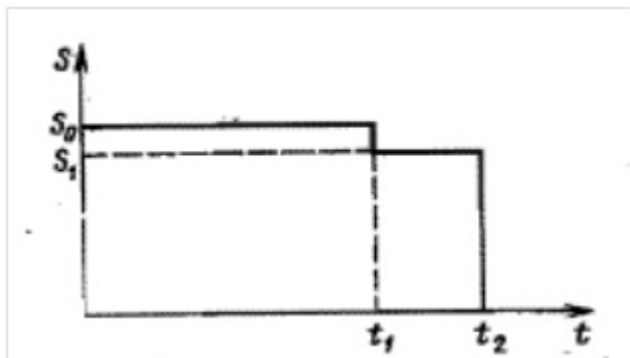


Рис. 3.3.2.1

тографирования облаков с борта искусственного спутника Земли. Показателем эффективности системы считается суммарная отснятая площадь. Зоны видимости камер частично перекрываются. Восстановление отсутствует. Время работы системы t_p определяется объемом памяти. В начале работы обе камеры заведомо исправны. Распределения наработки до отказа показательные с параметром λ .

Разделим множество траекторий G на три подмножества и запишем их вероятности (рис. 3.3.2.1).

а) подмножество G_0 или траектория полной исправности; ее вероятность равна $e^{-2\lambda t_p}$;

б) подмножество G_1 : до момента t_p отказал один аппарат, причем на каждой траектории это случилось в бесконечно малом интервале dt вблизи момента t_1 ; траектории подмножества различаются только значением t_1 ;

в) подмножество G_2 : до момента t_2 отказали оба аппарата, первый — в интервале dt_1 вблизи момента t_1 , а второй — в интервале dt_2 вблизи момента t_2 , траектории различаются значениями t_1 и t_2 .

Для определения весов имеется следующая информация. Размер отснятой площади зависит от условий освещенности, скорости съемки, площади каждого кадра S и времени работы t , причем от трех последних факторов — линейно. Поскольку при отказах меняются только площадь (S_0 — при двух камерах, S_1 — при одной) и времена пребывания в разных состояниях (t_1 и $t_1 - t_2$ соответственно), запишем показатель эффективности, обобщив остальные факторы в виде множителя A :

$$E = AS t \text{ при } S = \text{const.}$$

Множитель A везде сократился, избавив нас от анализа освещенности облаков и скорости съемки. Для определения «весов» оказалось достаточным определить отношение k площади кадра двух камер к площади кадра одной, абсолютные значения этих площадей также не понадобились.

Теперь по общей формуле можно вычислить:

$$\begin{aligned} K_{\text{эф}} = P(g_0) + \int_{G_1} W(g) dP(g) + \int_{G_2} W(g) dP(g) = e^{-2\lambda t_p} + \\ + \frac{2\lambda e^{-\lambda t_p}}{t_p} \int_0^{t_p} (k t_p + (1 - k) t_1) e^{-\lambda t_1} dt_1 + \\ + \frac{2\lambda^2}{t_p} \int_0^{t_p} \int_{t_1}^{t_p} (k t_2 + (1 - k) t_1) e^{-\lambda(t_1 - t_2)} dt_1 \times \\ \times dt_2 = \frac{1}{\lambda t_p} \left(\frac{1}{2} + k - 2k e^{-\lambda t_p} - \left(\frac{1}{2} - k \right) e^{-2\lambda t_p} \right). \end{aligned}$$

Метод статистического моделирования, часто упоминаемый в литературе как очень перспективный, можно считать частным случаем метода усреднения по траекториям. Действительно, он сводится к многократному (L раз) расчету эффективности изделия, причем каждый раз траектория изделия и другие факторы на интервале t_p задаются случайным образом в соответствии с их вероятностями. В каждой l -й реализации определяется $\varepsilon(\omega_l, g_l)$, после чего E вычисляется как среднее:

$$E = \frac{1}{L} \sum_L \varepsilon(\omega_l, g_l)$$

Отдельно должна определяться E_0 с помощью многократного расчета $\varepsilon(\omega, g_0)$. После этого $K_{\varepsilon\phi}$ определяется делением E на E_0 . Все это обычно очень трудоемко, даже если моделирование возможно на ЭВМ. Там, где применимы другие методы данной главы, модель для определения $\varepsilon(\omega, g)$ можно использовать значительно рациональнее, а именно для определения весов траекторий, состояний (п. 3.3.3) или для выделения контуров обслуживания (п. 3.3.4).

3.3.3. УСРЕДНЕНИЕ ПО СОСТОЯНИЯМ

Суть метода. Отличие от предыдущего случая состоит в том, что здесь усреднение проводится не по всем траекториям, а только по «горизонтальным» g_i , каждая из которых соответствует пребыванию изделия в определенном i -м состоянии от начала и до конца работы (рис. 3.3.3.1). Число состояний конечно, и интеграл (3.3.2.3) переходит в сумму:

$$K_{\varepsilon\phi} = \sum W_i P_i, \tag{3.3.3.1}$$

где $P_i = P(g_i)$ — вероятность того, что изделие окажется в i -м состоянии к началу работы и далее останется в нем; $W_i = W(g)$ — относительная эффективность изделия в i -м состоянии (на i -й траектории), или «вес» состояния.

Таким образом, здесь отбрасываются траектории, соответствующие переходам изделия из состояния в состояние. Ошибка тем меньше, чем меньше вероятность таких переходов за время t_p . Это, в свою очередь, имеет место либо при малых временах t_p , либо при высокой безотказности и малой ремонтпригодности компонентов изделия, а точнее говоря, когда время работы мало по сравнению со средним временем между переходами. Там, где это условие выполнено, вероятности P_i определяются вероятностями попадания изделия в i -е состояние к началу работы (рис. 3.3.3.1). Именно этот случай рассмотрен в [7], где вероятности P_i вычисляются с помощью коэффициентов готовности компонентов изделия:

$$P_i = \prod_k K_{gk} \prod_l (1 - K_{gl})$$

где индексы k относятся к компонентам, исправным в i -м состоянии, а индексы l - к компонентам, неисправным в i -м состоянии. Напомним, что совокупность работоспособных и отказавших компонентов как раз и определяет состояние изделия.

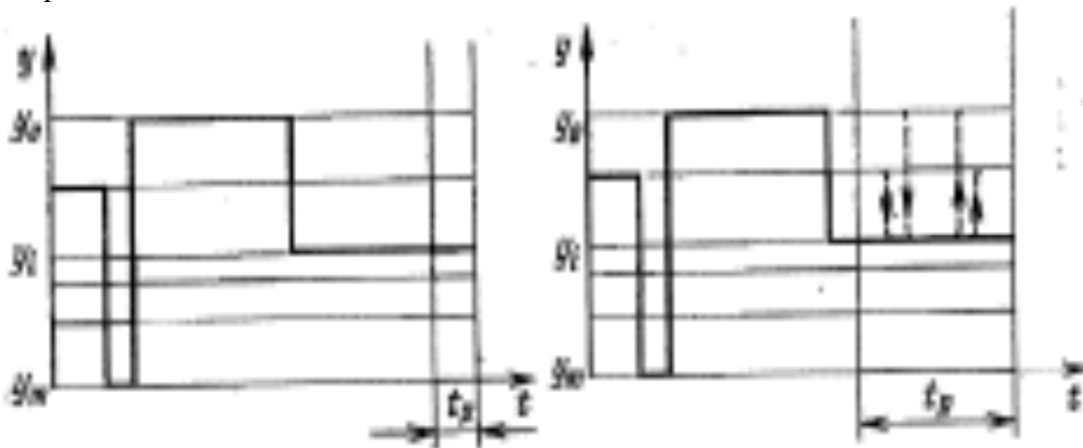


Рис. 3.3.3.1

Рис. 3.3.3.2

Коэффициент готовности здесь, очевидно, понимается как вероятность пребывания компонента в состоянии работоспособности в момент начала работы.

На практике, однако, изделия указанного типа относительно редки. Например, там, где время t_p сопоставимо с временем восстановления, вероятность отказа (т. е. перехода на более низкий уровень) уже сопоставима с величиной $1 - K_g$, тогда как в (3.3.3.1) она предполагается равной нулю. В таких случаях (3.3.3.1), очевидно, завышает результат.

Чтобы расширить область применения усреднения по состояниям и уже во всяком случае избежать завышения оценки, для расчета P_i вместо коэффициентов готовности обычно используют коэффициенты оперативной готовности, рассчитанные на время t_p :

$$P_i = \prod_k K_{огk} \prod_l (1 - K_{огl}) \quad (3.3.3.2)$$

Нетрудно видеть, что в (3.3.3.2) не только включена вероятность одной горизонтальной траектории с сохранением i -го состояния, но и добавлены вероятности тех переходных траекторий, которые либо приходят «сверху» из состояний с большей работоспособностью, либо уходят из i -го состояния «вверх» из-за восстановления (рис. 3.3.3.2). Формула (3.3.3.2) всем этим траекториям автоматически приписывает вес i -го состояния W_i . Таким образом, она дает точное решение для изделий, у которых эффект на каждой траектории равен эффекту наихудшего из состояний, через которые данная траектория проходит. В большинстве случаев, однако, этот эффект выше, и тогда (3.3.3.2) занижает результат. Исключение составляют изделия, у которых сам по себе переход из состояния в состояние резко снижает выходной эффект.

Область применения метода. В [7] эта область ограничена изделиями кратковременного действия. Как следует из сказанного, она определяется только скоростью переходных процессов в изделии и требуемой точностью расчетов. Оценка с помощью (3.3.3.1) в этом отношении наиболее требовательна, она пригодна практически только для изделий «мгновенного» (т. е. очень кратковременного) действия — такой термин, по-видимому, лучше характеризует область применения (3.3.3.1) и соответствующих формул [7]. Однако незначительное усложнение — замена K_g на $K_{ог}$ — существенно расширяет возможности применения метода. Мы видели, что (3.3.3.2) дает точное решение для одного класса изделий независимо от длительности их действия. Очень перспективно применение метода для изделий длительного действия в сочетании с усреднением по требованиям (см. п. 3.3.4). В остальных случаях метод занижает результат, и тем больше, чем (при прочих равных условиях) больше время работы изделия.

Учет частичных отказов компонентов. Такой учет здесь кроме того, что имеет другие очевидные достоинства, позволяет сократить число рассматриваемых состояний. Действительно, пусть некоторая система разделена на две подсистемы A и B . Если подсистема A может находиться в m состояниях, а подсистема B — в n состояниях, то общее число состояний системы mn . Но если вычислить отдельно $K_{эфA}$ и $K_{эфB}$ для каждой подсистемы (считая при этом другую полностью исправной) и найти $K_{эф}$ системы усреднением по четырем ее состояниям по формуле, сходной с (3.3.3.1) и (3.3.3.2):

$$K_{эф} = K_{эфA}K_{эфB} + W_1K_{эфA}(1 - K_{эфB}) + W_2K_{эфB}(1 - K_{эфA}), \quad (3.3.3.3)$$

то потребуется рассмотреть всего $m + n + 4$ состояний. Это явно экономичнее.

Если выписать оба варианта расчетных формул для $K_{эф}$, то нетрудно убедиться, что и в формулу (3.3.3.3) войдут веса всех mn состояний системы со своими вероятностями, однако каждому из них вместо истинного веса будет приписан вес W^* :

$$W^* = W_{iA}W_{iB}, \quad (3.3.3.4)$$

где i_A, i_B — индексы состояний подсистем A и B , образующих i -е состояние изделия; W_{iA}, W_{iB} — веса соответствующих состояний подсистем.

При этом формулы будут точны для $m + n$ слагаемых, соответствующих состояниям с отказами одной подсистемы и без отказов другой, так как для них один из весов W_{iA} или W_{iB} равен 1. Разница будет только в слагаемых, соответствующих состояниям с отказами в обеих подсистемах, вероятности которых обычно малы. Одного этого достаточно, чтобы описываемый прием оказался приемлем в ряде

случаев. Однако и погрешность формулы (3.3.3.3) может оказаться вполне допустимой, как показано далее (см. *перемножение весов*).

В общем случае выражение типа (3.3.3.3) можно рассматривать как эмпирическую формулу, хорошо совпадающую с точной. Однако, когда показателем эффективности системы (а значит, и подсистем) является вероятность выполнения некоторой задачи, (3.3.3.3) приобретает определенный физический смысл. Действительно, тогда **Кэф** становится вероятностью несрыва задачи, возложенной на систему (подсистему). Если считать, что каждая подсистема может находиться в двух новых состояниях: «задача сорвана отказами» и «задача не сорвана», то можно представить и новое пространство состояний системы с их вероятностями и «весами». Тогда (3.3.3.3) является усреднением по этим состояниям; $K_{эфA}$ и $K_{эфB}$ используются просто как вероятности, и выражение, например, $K_{эфA} (1 - K_{эфB})$ имеет следующий смысл: в подсистеме **A** отказы не сорвали выполнение задачи, а в подсистеме **B** — наоборот.

Определение весовых коэффициентов. Это важная часть расчета Кэф методом усреднения по состояниям. В п. 1.3 указывалось, что трудности в определении весов зачастую являются предлогом для того, чтобы не учитывать в оценках частичных отказов, а тем или иным способом сводить все уровни работоспособности к двум — номинальному и нулевому. Таким образом, способы вычисления весов заслуживают внимательного рассмотрения. Далее перечислены некоторые наиболее общие рекомендации, помогающие решению этой задачи на практике. В основном они относятся к системам массового обслуживания, показателем эффективности которых является либо вероятность обслуживания одного требования (заявки на обслуживание), либо среднее количество обслуженных за время работы заявок. Это очень широкий класс изделий; кроме того, к ним можно свести и ряд других изделий (см. п. 3.3.4).

Будем различать снижение эффективности из-за пониженной производительности изделия (снижение скорости работы, невыполнение функций по отношению к некоторой части обслуживаемых объектов или обрабатываемой площади, и т. п.) и из-за пониженного качества работы.

Снижение скорости работы изделия приводит обычно к пропорциональному снижению его эффективности. Если скорость работы, т. е. число заявок (объектов, задач, сообщений и т. п.), обслуживаемых изделием в единицу времени, при полной его исправности равна m_0 , а в *i*-м состоянии m_i , то, очевидно, и $W_i = m_i/m_0$. (3.3.3.5)

К этому случаю сводится также уменьшение числа работоспособных каналов в многоканальных системах (m_i — число работоспособных, m_0 — общее число каналов).

Невыполнение функций по некоторым заявкам оценивается аналогично (3.3.3.5). Для этого необходимо знать долю Q_i^* необслуживаемых заявок в общем их количестве. Тогда

$$W = 1 - Q_i^*. \quad (3.3.3.6)$$

Если в *i*-м состоянии не обслуживаются объекты определенного типа, то Q_i^* — доля объектов данного типа. Если не обслуживаются объекты в определенной зоне или в некотором интервале времени, то Q_i^* — доля объектов в данной зоне или интервале. При всех таких отказах произвольный объект (заявка) либо будет обслужен изделием с номинальным качеством, либо не будет обслужен вообще.

Сокращение обрабатываемой площади, объема и т.п. возможно не только в системах массового обслуживания. Однако расчет весов здесь производится аналогично, причем Q_i^* вычисляется как доля площади (объема и т. д.), не обрабатываемой изделием в *i*-м состоянии.

Можно утверждать, что определение весов, в большинстве случаев связанных со снижением производительности изделия, требует привлечения минимальной, и, как правило, доступной информации. Самая большая работа, которая может потребоваться при этом, — согласование между разработчиком и заказчиком некоторых положений, конкретизирующих условия использования изделия. Примером таких положений является распределение обслуживаемых объектов по типам, размещение по зонам и т. п.

Снижение эффективности из-за ухудшения качества работы часто удается свести к снижению производительности. Рассмотрим автоматизированный цех, включающий три одинаковых поточных линии для выпуска однотипных деталей. При отказе одной из них две другие начинают работать в ускоренном темпе, так что производительность цеха снижается всего на 15%. Однако ускорение ведет к снижению точности обработки, возрастает скрытый брак, обнаруживаемый только при эксплуатации

изделий. Здесь можно считать, что ускорение не применяется, а при отказе одной линии две другие выпускают свои детали с номинальным качеством, тогда вес $W = 0.66$. Нетрудно показать, что это оценка снизу. Действительно, если считать, что разработчиками цеха выбрана наиболее эффективная стратегия, то наша «предполагаемая» заведомо хуже. Если разработчики ошиблись, то через некоторое время это неизбежно выяснится и будет применена именно «наша» стратегия.

К этому следует добавить, что, вообще говоря, наилучшей стратегией специалиста по надежности в такой ситуации является, конечно, оценка весов для всех возможных вариантов и выбор из них наиболее целесообразного.

Описанный прием можно изложить и в таком виде: если в каком-либо состоянии работа изделия может осуществляться различными способами, то оценка веса, проведенная для любого из них, будет либо точной, либо заниженной. Погрешность же в сторону занижения в оценках надежности обычно считается допустимой или по крайней мере более предпочтительной, чем в сторону завышения.

Если не сводить снижение качества к снижению производительности, необходимо выделить те характеристики изделия, которые ухудшаются в данном состоянии. Затем необходимо использовать зависимость эффективности изделия от этих характеристик. В приведенном примере, если эффективностью цеха считается прибыль, необходима зависимость, выражающая долю скрытого брака как функцию точности обработки. Зная прибыль, получаемую от одной годной детали C_0 , и убыток от одной бракованной детали C_1 , можно определить вес состояния как отношение

$$W = [C_1 - d(C_0 + C_1)]/C_0, \quad (3.3.3.7)$$

где d — доля бракованных изделий при ускоренной обработке.

Поскольку нередки случаи, когда число работоспособных состояний изделия очень велико и рассмотреть их все не представляется возможным, актуален вопрос о способах сокращения количества определяемых весов. Для этого обычно применяют два приема: перемножение весов и отбрасывание маловероятных состояний.

Перемножение весов — удобный прием, позволяющий приближенно находить веса для состояний с многими отказавшими компонентами, если известны веса для состояний, где эти компоненты отказывают по одному. Ранее был описан случай, когда веса перемножаются «автоматически». Рассмотрим вновь две подсистемы A и B , принимая обозначения формулы (3.3.3.3), и попробуем оценить погрешность замены W_i на W_i^* . Будем считать, что подсистемы «включены» последовательно (для параллельных подсистем вопрос пока не изучен).

Прежде всего отметим, что (3.3.3.3) абсолютно правильно, если частичные отказы подсистем A и B снижают вероятность выполнения задачи независимо друг от друга. Так будет, например, если у A уменьшена производительность — отказала часть каналов, а B работает с пониженной точностью. То же можно утверждать, если частичные отказы и A и B сводятся к уменьшению числа каналов, причем распределение поступающих задач (заявок на обслуживание и т. п.) по каналам не меняется при отказах.

Если же при отказах возможно перераспределение задач, например, перевод исправных каналов A на задачи, обработанные исправными каналами B , то W_i будет больше, чем W_i^* , а именно:

$$W_i = \min\{W^A, W^B, W^A \cdot W^B\} \quad (3.3.3.8)$$

Формула (...) справедлива и тогда, когда в обеих подсистемах понижена скорость работы. При этом, очевидно, скорость работы изделия определяется наименьшей из скоростей подсистем.

Однако в тех случаях, когда частичные отказы и в A и в B приводят к ухудшению качества работы, W_i может быть и меньше W_i^* , так как зависимость вероятности выполнения задачи от качественных показателей подсистем в общем случае нелинейна. Одновременное ухудшение качества работы двух «последовательных» подсистем может снизить эффективность изделия до любого уровня, включая нулевой. Так, если одна поточная линия выпускает детали, работающие на истирание, с несколько уменьшенной толщиной рабочего слоя, а следующая линия обеспечивает несколько ухудшенную термообработку этого слоя, то в итоге детали могут быть совершенно негодными, что эквивалентно полному отказу цеха.

Таким образом, во всех ситуациях, за исключением последней, $W_i > W_i^*$, т. е. перемножение весов может лишь занижать результаты расчетов. В трудных случаях завышение можно исключить, положив в одной из подсистем веса состояний с ухудшенным качеством работы равными нулю.

Важно отметить, что погрешности, обусловленные неточностью определения весов, обычно слабо влияют на результат, так как они умножаются на вероятности соответствующих отказов состояний — обычно малые величины. Погрешности же, обусловленные перемножением весов, умножаются на вероятности состояний с двумя и более отказавшими устройствами и поэтому, как правило, пренебрежимо малы.

Отбрасывание маловероятных состояний — широко распространенный прием, существенно сокращающий трудоемкость оценки надежности сложного изделия. В подавляющем большинстве случаев для оценки бывает достаточно рассмотреть состояния с одним, изредка — с двумя отказавшими компонентами. Вероятности остальных состояний обычно ничтожно малы и быстро убывают с увеличением числа отказавших компонентов (формула (3.7)). Во всяком случае, такое отбрасывание всегда занижает результат, а величину отбрасываемых слагаемых нетрудно оценить.

Пример 3.2. Рассмотрим приемную систему, главная функция которой — прием особо важного сигнала. В ожидании этого сигнала система полностью включена, отказы немедленно устраняются. В случае получения сигнала система должна удерживать связь в течение небольшого времени t_p , после чего отключается. Эффективностью считается вероятность приема указанного сигнала вместе с информацией, поступающей вслед за ним в течение времени t_p . В систему входят два приемника, поддерживающие связь с двумя одинаковыми группами объектов, от любого из которых может поступить ожидаемый сигнал, и еще один резервный приемник. При необходимости каждый приемник может охватить 70% всех объектов.

Перечислим состояния.

- а. Состояние $i = 0$, все три приемника исправны:
«вес» $W_1 = 1$, вероятность состояния = $(Koz(tp))^3$,
- где $Koz(tp)$ — коэффициент оперативной готовности одного приемника;
- б. Состояние $i = 1$, один приемник отказал (таких состояний три):
«вес» $W_2 = 1$, вероятность состояния = $(Koz(tp))^2(1 - Koz(tp))$;
- в. Состояние $i = 2$, отказали два приемника, третий работает с 70% объектов (таких состояний тоже три):
«вес» $W_3 = 0,7$, вероятность состояния = $(Koz(tp))(1 - Koz(tp))^2$.

Учитывая количество одинаковых состояний, на основании (3.5) можно записать

$$Kэф = (Koz(tp))^3 + 3(Koz(tp))^2(1 - Koz(tp)) + 3*0,7(Koz(tp))(1 - Koz(tp))^2.$$

Отметим еще раз преимущество относительных величин W_i перед абсолютными E_i и E_0 : нам удалось найти $Kэф$, даже не интересуясь видом связи: проводная, тропосферная и т. д. Но если бы мы попытались найти E и E_0 , чтобы найти $Kэф$ делением, нам пришлось бы заняться вопросами устойчивости данного вида связи, радиопомехами, прохождением радиоволн и т. п. Очевидно, что для вычисления $Kэф$ такая работа была бы совершенно излишней, так как ее результаты в конце концов сокращаются.

3.3.4. УСРЕДНЕНИЕ ПО ЗАЯВКАМ

Суть метода. Рассмотрим систему массового обслуживания, предназначенную для обработки некоторого потока требований (заявок) на обслуживание, эффективность которой характеризуется либо средним количеством заявок, обслуживаемых за определенное время, либо средней вероятностью обслуживания требования, поступающего на вход системы. Как уже указывалось, это очень широкий класс изделий: к ним относятся, например, системы управления технологическими процессами (заявками являются единицы выпускаемой продукции) и транспортными средствами (заявки — поезда, самолеты, суда), средства связи (передаваемые сообщения) и т. п.

Будем характеризовать входной поток общим числом заявок n_k , поступивших за время работы изделия tp . Пусть n_0 — число заявок из n_k , обслуживаемых полностью исправной системой, л — то же

для системы с отказами; в общем случае они — случайные величины. В этих обозначениях эффективность системы характеризуется одним из двух показателей:

$$E = M[n], \quad (3.15)$$

$$E = P = M[p] \quad (3.16)$$

где P — средняя вероятность обслуживания заявки.

Запишем определение $K_{эф}$, одинаковое для обоих показателей эффективности:

$$K_{эф} = M[n] / M[ло]. \quad (3.17)$$

Разделим поток заявок на группы, включая в одну группу заявки с одинаковой вероятностью обслуживания. Практически это заявки, обслуживаемые однотипными компонентами системы за одинаковое время. Сюда, например, заведомо относятся поезда, повторяющие один и тот же маршрут ежедневно (т. е. отмеченные в расписании одним номером). При таком разделении

$$n_j = 2 \text{ я}, \quad n_j = 2 \text{ н}, \quad \langle \text{я} \rangle = \langle \text{н} \rangle,$$

$$I_j = I, \quad I_j = I$$

$$P_j = P, \quad P_j = P$$

где индексом j отмечены соответствующие величины для j -й группы.

Обозначим $M[ло] = M[n]$ и запишем в виде

$$K_{эф} = \frac{M[n]}{M[n]} = 1.$$

$$K_{эф} = \frac{M[n]}{N_0} = \frac{M\left[\sum_j n_j\right]}{N_0} = \frac{\sum_j M[n_j]}{N_0}$$

В свою очередь, $M[n_j] = n_j P_j$, где P_j — вероятность обслуживания заявки j -й группы.

Введем вероятность обслуживания заявок j -й группы полностью исправной системой P_j (она не зависит от надежности системы). Обозначив отношение P_j , можно записать

$$K_{эф} = \sum_j \frac{n_j P_j}{N_0} = \sum_j \frac{n_j P_j K_j}{N_0} = \sum_j \frac{n_j}{N_0} K_j$$

Отношение n_j / N_0 означает долю заявок j группы в общем количестве заявок, обслуживаемых полностью исправной системой. Оно также не зависит от надежности. Следовательно, $K_{эф}$, определяется как вероятность усредненная по всем этим заявкам

Рассмотрим вероятность $K_{эф}$. Согласно изложенному это есть $K_{эф}$ системы, вычисленный применительно к ам j группы, т. е. фактически к одному требованию j -го типа. Таким образом, оценка системы, обслуживающей множество заявок, уже существенно упростилась. При такой оценке многие системы, работающие как угодно долго (в том числе круглосуточно в течение многих лет), можно считать системами кратковременного действия, так как речь теперь пойдет об интервале обслуживания одной заявки t_p , которое, как правило, значительно меньше общего времени работы изделия t_p . Отметим, что время t_p не входит в формулу (3.19), оно фактически сократилось. Значит, для расчета $K_{эф}$ может оказаться приемлемым метод усреднения по состояниям (§ 3.2). Однако возможны и дальнейшие упрощения [8, 25].

Как правило, отдельное требование обслуживается не всей системой, а только некоторой ее частью. Тогда для $K_{эф}$ деления K , нужно из состава системы выделить совокупность подсистем, которые участвуют в обслуживании именно данного конкретного заявки. Эти подсистемы будем называть контуром обслуживания (КО). КО различных заявок не обязательно состоят из различных подсистем — они могут иметь общие элементы, а в пределе быть полностью идентичными (разница будет только во времени обслуживания). Теперь расчет $K_{эф}$ дополнительно облегчается меньшим объемом изделия, а отсюда — меньшим числом состояний и т. д. Во многих случаях уменьшение объема приводит к тому, что КО можно считать изделием вида I. Для таких изделий при данном показателе эффективности обычно переходит в коэффициент оперативной готовности $t_{ог}(t_j)$ или вероятность безотказной работы $P(t_j)$ в зависимости от начальных условий в момент начала обслуживания заявок j -й группы (см. § 3.4,

случаи *в, с, и*). Это следует и из того очевидного положения, что для КО вида I обслуживание не будет сорвано только при условии работоспособности КО в течение всего интервала t_j .

Тот факт, что величины K_j выражают вероятности зависимых событий, не препятствует расчету, так как для вычисления математического ожидания это не имеет значения, а их перемножение нигде не применяется.

Время t_j , на которое рассчитываются упомянутые вероятности, вообще говоря, может отличаться от времени обслуживания t -го заявки. В ряде изделий заявки поступают на вход системы значительно раньше того момента, когда можно начинать собственно обслуживание. Так, в систему управления портовым разгрузочным оборудованием сообщение о прибывающем корабле может поступить задолго до начала каких-либо конкретных действий по разгрузке, и он уже будет учтен при составлении предварительного графика работ— формально обслуживание начнется. Однако после этого график будет неоднократно пересмотрен с учетом других кораблей, а оборудование может неоднократно отказать и восстановиться к началу разгрузки данного корабля без ущерба для его обслуживания. Здесь, очевидно, t_j меньше времени обслуживания. В других же изделиях возможны дополнительные условия, необходимые для обслуживания каждой заявки, на первый взгляд не относящиеся к нему. Например, доставка пассажира трамвая к месту назначения возможна лишь при условии, что несколько предыдущих трамваев успешно прошли маршрут и не остановили движения. Здесь в КО должны включаться все эти трамваи, каждый со своим временем работы, причем общий интервал t_j будет, естественно, больше времени обслуживания одного пассажира.

Подводя итоги, можно сформулировать правило определения t_f оно определяется как интервал, в котором отказ КО (подсистемы) ведет к срыву обслуживания заявки.

Для различных подсистем, входящих в КО, время t_j может быть различным в зависимости от выполняемых операций.

Выделение КО определяется спецификой системы. Во многих случаях для этого достаточно провести самый простой анализ (см. пример 3.3). Это относится, в частности, к системам типа транспортных, работающих по расписанию. Для систем, работа которых сильно зависит от случайных факторов, можно применить универсальный способ — моделирование без учета отказов. Как правило, при таком моделировании можно не учитывать и целый ряд других факторов, не влияющих на формирование КО.



Сравнительно легко выделить КО в большинстве так называемых ветвящихся структур. Так, для ветвящейся системы массового обслуживания любого ранга с равнозначными элементами все КО одинаковы и каждый состоит из цепочки последовательно соединенных элементов от низшего до высшего ранга включительно. Отсюда сразу следует сделанный в [7] вывод о том, что $K_{эф}$ такой системы равен оперативному ПН указанной цепочки.

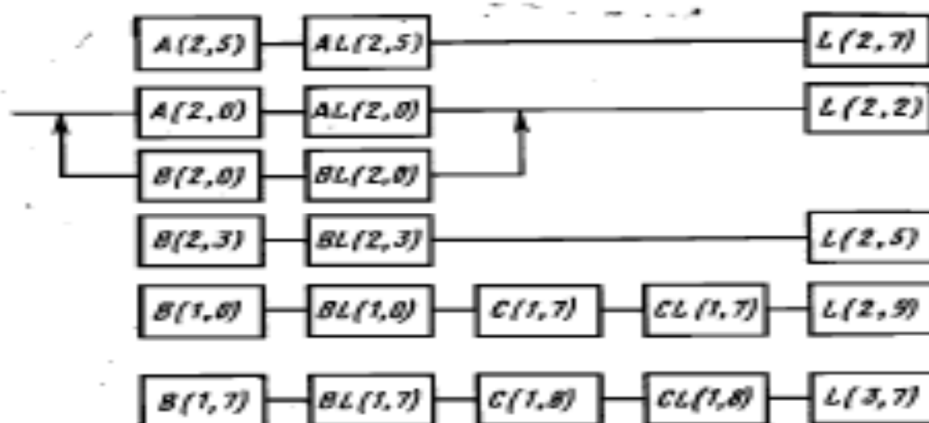
Пример 3.3. Три радиолокатора *A, B* и *C* круглосуточно обслуживают аклеты самолета между городами *D, E, F, O* и // по трассам, изображенным жирными ширями и в рис. 3.4. Все рейсы можно разделить на пять групп (1—5), характеризующих трассой, долей рейсов по трассе и оценой рейсов. Длительность полета, и сочетанием обслуживающих локаторов (табл. 3.1). Локаторы должны сопровождать каждый самолет и передавать данные в пункт управления движением на всех трассах. Кроме того, за несколько часов до начала каждого рейса диспетчерский пункт начинает подготовку работы в его водготовке, в противном случае является работа в последние 0.2 ч. Отказ диспетчерского пункта на 0.2 ч срывает рейс.

Требуется рассчитать эффективность

системы, состоящей из объектов A, B, C, L и линий связи между ними. рассматривая их так как графа вида Г. Показателем эффективности системы считается вероятность полного обслуживания рейса, т.е. выполнения задач по его заготовке, снаряжению и укомплектованию на всей трассе.

Выделим пять КО. Для трасс DL и FG они отличаются только объектами, а следовательно, и надежностью линий связи AL и BL . На трассе EF локации резервируют друг друга, на трассе EH они охлещаются последовательно (некоторым перекрытием объектов на трассах DE, FG и FH пренебрегаем, несколько занижая результат). На рис. 3.5 представлены схемы расчета коэффициентов сохранения эффективности K_j для пяти КО. Объекты обозначены буквами в соответствии с рис. 3.4. линии связи между ними — двумя буквами. Время работы подсистем в часах по каждой группе рейсов указано в скобках.

Вероятность P_j , для КО 1, 3, 4 и 5 определяется, очевидно, как вероятность того, что все компо-



ненты КО будут работоспособны к началу выполнения своих частных задач по обслуживанию рейса и не откажут до их окончания. Иными словами, K_j здесь вычисляется как произведение значений коэффициентов K_{ij} (где i — индекс подсистемы КО). Далее индекс от этих коэффициентов будем опускать.

Таблица 3.1

Группа (ГР)-ППЧ /	Прессе ял рис. 3.4	Д<« tWVroe	Врех* tkv юта t_a ч	< Услуги те кхде .rjtarrjc^ ^Hptna обс.:уяюювшы t_j . 4)
1	DE	0.30	2.5	$A(2,5)$
2	EF	0,35	2.0	$A(2,0), B(2,0)$
3	FG	0.10	2.3	$B(2,3)$
4	EH	0,10	2.7	$B(1,0), C(1,7)$
5	EH	0.15	3.5	$B(1,7), C(1,8)$

Для КО 2 в качестве одного из множителей произведения необходимо использовать коэффициент оперативной готовности дублированной цепочки локации — линия связи, рассчитанный на время $t_a = 2.0$ ч. С небольшим занижением его легко рассчитать как $1 - (1 - K_A(2,0) K_{AL}(2,0)) (1 - X^*(2,0) / S_{яx}(2,0))$, учитывая только вероятность непрерывной проводки одним или двумя локами (без учета возможности передачи от одного к другому). В итоге получаем расчетные формулы для пяти КО:

$$\begin{aligned}
 K_1 &= K_A(2,5) K_{AL}(2,5) K_L(2,7); \\
 K_2 &= (1 - (1 - K_A(2,0) K_{AL}(2,0)) (1 - \\
 &\quad - K_B(2,0) K_{BL}(2,0))) K_L(2,2); \\
 K_3 &= K_B(2,3) K_{BL}(2,3) K_L(2,5); \\
 K_4 &= K_B(1,0) K_{BL}(1,0) K_C(1,7) K_{CL}(1,7) K_L(2,9); \\
 K_5 &= K_B(1,7) K_{BL}(1,7) K_C(1,8) K_{CL}(1,8) K_L(3,7).
 \end{aligned}$$

Для системы $K_{эф}$ вычисляется по формуле (3.19):

$$K_{эф} = 0,30K_1 + 0,35K_2 + 0,10K_3 + 0,10K_4 + 0,15K_5.$$

Учет частичных отказов контуров и подсистем. Если КО являются изделиями вида II, то для них следует использовать другие способы расчета. Например, в КО₂ при отказе одного локатора мог бы произойти частичный отказ из-за перегрузки другого. При этом расчет К₂ можно было бы с нехорошим занижением провести методом усреднения по состояниям. Отметим, что все используемые в данном методе показатели надежности (и для КО, и для подсистем) имеют смысл вероятности того, что отказы той или иной части системы не мешают обслуживанию. Поэтому с этими показателями можно выполнять любые действия, применяемые к вероятностям (но с учетом ограничений, касающихся перемножения вероятностей — см. §32).

Если какая-либо подсистема имеет канальную структуру, то для нее тоже можно использовать данный метод, выделив внутри подсистемы контур — канал и рассчитав его надежность. Это прежде всего относится к линиям связи, поскольку они обычно являются частью некоторой сети. Отсюда вытекает актуальность исследований так называемой канальной надежности (10).

Область применения метода. В начале параграфа были сформулированы ограничения на тип изделия и вид показателя его эффективности. Еще одно ограничение, важное для некоторых систем, обусловлено тем, что заявки, потерянные из-за отказов, здесь считаются потерянными окончательно (это основной недостаток метода). Так, не учитывается возможность повторного обслуживания другим КО или перестройки системы при отказах (например, возможность изменения трасс самолётов при отказе локатора). Учет подобных особенностей требует изыскания специальных приемов. Однако ошибка, вносимая указанным фактором, приводит только к занижению результата.

Применение метода к другим изделиям, не являющимся системами массового обслуживания в обычном смысле, в ряде случаев оказывается и возможным и целесообразным. Иногда удается, определив соответствующим образом понятие «заявка», все-таки свести такие изделия к описанной схеме. Рассмотрим этот прием на примере 3.4, который ранее был решен методом усреднения по траекториям (см. пример 3.1).

Пример 3.4. В условиях примера 3.1 будем считать требованием каждую единицу площади на трассе спутника (ее требуется сфотографировать, т. е. «обслужить»). Тогда эффективность, определяемая как суммарная отснятая «площадь», будет равна сумме обслуженных заявок, и мы получим право применить усреднение по заявкам.

В КО каждого заявки включим оба аппарата и будем рассматривать КО как изделие вида II с четырьмя состояниями. Все КО₁ таким образом, будут одинаковыми по составу, но различными по вероятностям состояний, зависящим от времени. Можно считать полностью одинаковыми только КО тех заявок (снимков), которые близки по времени, а именно сосредоточены в малом интервале dt . Доля их в общем количестве dN теперь выполняет непрерывная функция $K(t)$, где t — текущее время. Для определения этой функции рассмотрим следующие состояния контура — системы:

- а) оба аппарата исправны; вероятность этого состояния в момент t равна $W_0 = 1$;
- б) один аппарат исправен, другой отказал (таких состояний два), вероятность состояния в момент t равна $e^{-\lambda t}$, вес V^i/S^i — это вероятность того, что единица площади («требование») окажется в зоне видимости исправного аппарата.

Усредняя по состояниям, получаем

$$(3.20)$$

Усреднение по заявкам сводится к интегрированию по времени, при этом формула (3.19) принимает вид

$$K_{\text{эф}} = \frac{1}{t_p} \int_0^{t_p} K(t) dt = \frac{1}{\lambda t_p} \left(\frac{1}{2} + k - 2ke^{-\lambda t_p} - \left(\frac{1}{2} - k \right) e^{-2\lambda t_p} \right),$$

(3.21)

что совпадает с (3.4). Таким образом, тот же результат получен существенно проще. С увеличением числа устройств это различие усиливается, так как кратность интеграла (3.4) растет линейно, тогда как интеграл (3.21) остается однократным.

3.4. КОЭФФИЦИЕНТ СОХРАНЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИЗДЕЛИЙ ВИДА I

Рассмотрим несколько наиболее распространенных типов изделий и определим K^+ , если изделие имеет всего два уровня работоспособности. Формула для K^+ определяется, очевидно, видом функции выходного эффекта изделия и особенностями его функционирования. Будем считать, что работа начинается в момент $t=0$ и заканчивается при $t=T$. Результаты расчетов приведены в табл. 3.2.

Рассмотрим три вида функций выходного эффекта $e(g)$, считая, что факторы ω не зависят от процесса $\{g\}$ т. е. от траектории g :

— эффект пропорционален суммарному времени безотказной работы, т. е.

$$\varepsilon(\omega, g) = A(\omega) \sum_n t_n(g) \quad 3.4.1.$$

где $A(\omega)$ — множитель, зависящий от факторов ω ; $t_n(g)$ — продолжительность n -го отрезка безотказной работы изделия ($0 \leq t_n(g) \leq M$ на g -й траектории);

— эффект пропорционален суммарному количеству безотказно проработанных интервалов (выполненных операций) длительностью t_n , которые случайным образом равномерно распределены на интервале $[0, T]$, т. е.

$$\varepsilon(\omega, g) = B(\omega) \sum_n m_n(g) \quad 3.4.2$$

где $B(\omega)$ — множитель, зависящий от факторов ω ; $m_n(g)$ — число интервалов длительностью t_n целиком уместившихся на n -м отрезке безотказной работы e и траектории.

— эффект принимает некоторое значение $C(\omega) > 0$, если изделие проработало безотказно весь интервал, и равно нулю, если оно отказало до его окончания, т. е.

$$\varepsilon(\omega, g) = \begin{cases} C(\omega) & \text{при } t_1 > t_p, \\ 0 & \text{при } t_1 < t_p, \end{cases} \quad (3.4.3)$$

где $C(\omega)$ — величина, зависящая от факторов ω ; t_p — время от начала работы до первого отказа изделия.

Рассмотрим теперь различные сочетания вариантов технического обслуживания изделия перед работой (в режиме ожидания) и в ходе работы с этими вариантами эффекта.

а). Изделие восстанавливается как перед работой, так и в ходе работы. Эффект определяется по формуле (3.22).

б). То же изделие, но с выходным эффектом, определяемым (3.23).

Таким образом, показатель эффективности с точностью до множителя представляет собой математическое ожидание количества выполненных за время t операций длительностью t , а изделие можно представить как систему массового обслуживания. Следовательно, можно применить усреднение по завыкам, считая требованием отдельную операцию.

в). То же изделие, но с выходным эффектом, определяемым (3.24). Здесь из всех траекторий одна обладает относительной эффективностью $\eta=1$ (это траектория полной исправности на интервале (t_p) , а остальные имеют нулевую эффективность. Вероятность этой траектории есть вероятность того, что изделие окажется исправным к началу интервала и не откажет в течение времени t_p , т. е. сразу получаем $K^* = K_m(t_p)$.

г). Изделие восстанавливается в режиме ожидания, а в работе не восстанавливается. Выходной эффект определяется (3.22).

д). То же изделие, но выходной эффект определяется формулой (3.23).

е) То же изделие, но выходной эффект определяется формулой (3.24). Этот случай ложжгп.ю лналощен случаю *в*. Действительно, наличие или отсутствие восстановления **в** ходе работы не имеет значения, так как независимо от него первый же отказ на интервале сводит эффект к нулю.

ж) В начале работы изделие заведомо исправно. Это возможно, например, если начало работы допускается сдвигать до устранения отказа, или если изделия отбирают перед применением. В ходе работы восстановление отсутствует. Выходной эффект определяется (3.22).

и) То же изделие, выходной эффект определяется (3.24).

к) Изделие не восстанавливается, перед работой выключено (режим хранения). В начале хранения изделие заведомо исправно. Работа начинается сразу же при возникновении потребности в ней, без отбора или ремонта. Выходной эффект определяется (3.24).

Этот случай является одним из немногочисленных примеров непосредственного влияния сохраняемости изделия на результат его работы.

Отметим еще раз, что во всех формулах отсутствуют коэффициенты **A**, **B** и **C**, определяющие абсолютные значения выходного эффекта и показателей эффективности.

Применив вышеизложенные методы [2], можно получить формулы, приведённые в таблице 3... Данная таблица в своё время была узаконена ГОСТом [3].

Для проверки ещё надо бы провести два предельных перехода: и /ол-*-/р.? что тоже сделано в[2]. Очевидно, что при этом выходной эффект (3.23) перейдет в (3.22) или в (3.24) соответственно, тогда и формулы должны перейти друг в друга – в этом легко убедиться.

Таблица 3.2

Специфика техобслуживания		Формулы для расчёта $K_{эф}$ при выходном эффекте $\varepsilon(\omega, g)$			
Перед работой	В ходе работы	$\varepsilon(\omega, g) =$ $= A(\omega) \sum_n t_n(g)$	$\varepsilon(\omega, g) =$ $= B(\omega) \sum_n m_n(g)$	$\varepsilon(\omega, g) =$	$C(\omega)$ при $t_1 > t_p$
					0 при $t_1 < t_p$
Включено, восстанавливается	Восстанавливается	K_r	$K_{ог}(t_{он})$	$K_{ог}(t_p)$	
Включено, восстанавливается	Не восстанавливается	$\frac{K_r T(1-P(t_p))}{t_p}$	$\frac{K_r T(P(t_{он})-P(t_p))}{t_p - t_{он}}$	$K_{ог}(t_p)$	
Включено. К работе допускаются только исправные изделия (отбор)	Не восстанавливается	$\frac{T(1-P(t_p))}{t_p}$	$\frac{T(P(t_{он})-P(t_p))}{t_p - t_{он}}$	$P(t_p)$	
Выключено (хранение). Изделия допускаются к работе без отбора и ремонта	Не восстанавливается	-	-	$P_{xp}P(t_p)$	

3.5. ВЫВОДЫ ПО РАЗДЕЛУ 3

Таким образом, существует по крайней мере два достаточно общих и практических метода расчета $K_{эф}$, область применения которых охватывает широкий круг изделий. Существует и наиболее общий метод — усреднение по траекториям, и его модификация — статистическое моделирование, применение которых ограничено только трудоёмкостью расчетов. Это ограничение может, конечно, стать серьезным препятствием для вычисления $K_{эф}$ изделий, к которым другие методы неприменимы. В таких случаях, по-видимому, следует снижать точность расчета путем сокращения числа учитываемых состояний, при этом изделие приближается к виду I. Однако до тех пор, пока число таких состояний больше двух, результат будет оставаться более точным, чем результат классического расчета.

Другой важный вывод состоит в том, что общеизвестные вероятностные оперативные ПН являются частными случаями $K_{эф}$. Для наиболее распространенных изделий вида I $K_{эф}$ переходит в $K_{ог}$, реже — в K_g , еще реже — в $P(t)$.

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА НАДЁЖНОСТИ

4.1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

4.1.1. Определения. Постановка задач.

Виды испытаний. По признаку «цель работы» испытания делятся на два класса:

- определительные;
- контрольные.

По признаку «стадия (этап) жизненного цикла изделия»:

- испытания в ходе разработки, опытные образцы (предварительные, приёмочные испытания);
- испытания в ходе серийного производства (приёмо-сдаточные, периодические, типовые, специальные – только на надёжность);
- испытания в процессе эксплуатации.

По признаку «метод испытаний»: различаются три метода в зависимости от соотношения используемых при этом расчетных и экспериментальных данных. Прямой экспериментальный метод (ПЭМ) предполагает наблюдение реализаций самой оцениваемой величины и применение расчетов только для их усреднения. Например, можно многократно проверять работоспособность изделия в разные моменты времени и получить оценку K_2^* как отношение числа положительных результатов n к числу проверок N : $K_2^* = n/N$. Косвенный экспериментальный метод (КЭМ) предполагает наблюдение и оценку некоторых других величин, так или иначе связанных с оцениваемой, и расчет последней по соответствующей формуле. Например, оценку K_2^* можно рассчитать через оценки T^* и T_v^* по формуле $K_2^* = T^*/(T^*+T_v^*)$. Расчетно-экспериментальный метод (РЭМ) сводится к раздельному набору статистики по m компонентам изделия и последующему расчету показателей надежности по формуле, учитывающей его структуру, типа $K_2 = K_2(T^*_i, T_v^*_i, i=1...m)$.

Технический (качественный) анализ дефектов – важнейшая составляющая работы по повышению надёжности, главный способ достижения требуемого уровня. Здесь необходимы этапы:

1. Выявление причины каждого дефекта.
2. Поиск путей её устранения.
3. Принятие мер по устранению причины.
4. Классификация по причинам возникновения для общих отчётов («чья вина»):
 - конструктивные (нарушение правил разработки);
 - производственные (нарушения технологии);
 - эксплуатационные (нарушения инструкции по эксплуатации);
 - деградационные, износные (естественные).

Все эти работы очень специфичны, так что здесь нельзя привести каких-то общих методов или путей решения.

Предварительная обработка статистики для количественных оценок сводится к исключению из статистики всех повреждений и части отказов, включая отказы:

Для оценки показателей надежности из всех неисправностей прежде всего выделяют те, которые привели к отказу изделия (части изделия, ОСС). Отказом считается снижение и тем более полная утрата изделием работоспособности. Затем из зафиксированных отказов выделяют те, которые не должны учитываться при оценке показателей. В настоящее время принят во многих организациях и стандартизован в широких масштабах следующий список неучитываемых отказов:

- а) зависимые (т. е. вторичные) отказы (присоединяются к первичному);
- б) отказы, вызванные внешними факторами, не предусмотренными в ЭД на изделие;
- в) отказы, вызванные нарушением персоналом инструкции по эксплуатации (ИЭ);
- г) отказы, возникшие по причинам, которые устранены доработками;
- д) отказы, вызванные применением методов прогнозирования отказов в процессе технического обслуживания.

Статистической обработке подвергаются результаты испытаний, «очищенные» предварительной обработкой. Статистическая обработка сводится к оценке параметров функций распределения случайных величин, определяющих искомые показатели надежности, т.е. к традиционной задаче математической статистики.

Возможность и целесообразность использования того или иного метода обработки, трудоемкость обработки и качество получаемых оценок существенно зависят от типа оцениваемого показателя надежности, объема априорных сведений о наблюдаемой случайной величине, характера статистического материала, который подлежит обработке.

При экспериментальной оценке показателей надежности многие задачи независимо от конкретного содержания имеют одинаковый алгоритм решения, так как для этапа статистической обработки не существенно:

- какое из свойств исследуется — безотказность, долговечность, ремонтпригодность или сохраняемость;
- обрабатываются ли результаты испытаний (специальных или совмещенных) или результаты наблюдений в процессе эксплуатации;
- производится восстановление отказавших изделий или их замена новыми;
- какими единицами измеряется наработка — количеством часов, циклов работы и т. п., мерами длины (провода, пряжи, пробега автомобиля) или мерами объема (жидкости, раствора, грунта).

Ниже рассматриваются наиболее существенные для этапа статистической обработки факторы:

- типы оцениваемых показателей;
- априорные сведения о наблюдаемой случайной величине;
- характер статистики при различных стратегиях испытаний.

Типы оцениваемых показателей надежности. При экспериментальных оценках надежности независимо от того, какое свойство исследуется, все многообразие оцениваемых показателей сводится к показателям двух типов:

- показатели типа наработка — средняя или γ -процентная (наработка до отказа, между отказами, до предельного состояния, срок сохраняемости, время восстановления и т.п.);
- показатели типа вероятности (безотказной работы, исправного состояния в произвольный момент, восстановления за заданное время и т.д.).

При определении показателей типа наработки непосредственно наблюдаемыми величинами являются случайные интервалы — наработки до отказа, между отказами, до предельного состояния, времени восстановления, времени хранения до отказа и т.п.

При определении показателей типа вероятности непосредственно наблюдаемыми случайными величинами являются числа событий в испытаниях — число отказов, число восстановлений, число предельных состояний и т.д.

С точки зрения характера сведений о функции распределения все многообразие практических задач сводится по существу к следующим двум вариантам.

1) Вид функции распределения наблюдаемой случайной величины известен априори. Задача статистической обработки — получение оценок для показателей надежности с учетом вида функции распределения и характера имеющегося статистического материала.

2) Вид функции распределения наблюдаемой случайной величины неизвестен или известен лишь предположительно. В этом случае на основании анализа процессов, приводящих к отказам, опыта эксплуатации аналогичных изделий и предварительного анализа полученной при испытаниях информации (например, по виду гистограммы) принимается некоторая гипотеза о виде функции распределения. Задача обработки — проверить, не противоречат ли экспериментальные данные принятой гипотезе, и оценить параметры этой функции распределения.

В такой постановке необходима подробная информация о наблюдаемой случайной величине, а процесс статистической обработки более сложен и трудоемок. В этом случае процесс статистической обработки в качестве обязательных должен включать следующие этапы:

- построение вариационного ряда;
- построение гистограммы;
- принятие гипотезы о виде функции распределения;

- оценка точечных значений параметров (для функции распределения предполагаемого типа);
- проверка непротиворечивости экспериментальных данных принятой гипотезе о функции распределения.

В случае положительных результатов этого этапа может быть проведена оценка интервальных значений параметров функции распределения (показателей надежности); в случае отрицательных результатов процесс повторяется, начиная с этапа принятия гипотезы при другом предположении о виде функции распределения.

Особым является случай, когда оценка параметров распределения не производится — требуется оценить непосредственно значение функции распределения в некоторой фиксированной точке, т.е. оценить показатель типа вероятности. Например: вероятность отказа или безотказной работы для фиксированной наработки; вероятность восстановления или невозможности восстановления за фиксированное время; вероятность наступления предельного состояния при заданной наработке; вероятность сохранения определенных показателей качества при хранении в течение заданного времени. Задача такого типа в математической статистике носит название непараметрической.

Этот случай является наиболее простым с точки зрения организации испытаний (наблюдений) и статистической обработки информации. Испытания каждого изделия проводятся в течение фиксированного времени (наработки), не обязательно по всем изделиям одновременно. Контроль функционирования может быть осуществлен только перед началом и по окончании испытаний. Подлежащие обработке результаты испытаний при этом представляют собой только два числа — общее число испытаний фиксированной длительности (число опытов) и число успешных опытов. Естественно, что при этом получаемая в результате статистической обработки оценка несет лишь минимальную информацию — значение функции распределения в единственной точке, соответствующей фиксированной наработке при испытаниях. Больше мы не имеем никакой информации и не имеем возможности экстраполировать оценку для других значений наработки.

Характер статистики при различных стратегиях испытаний. На практике в большинстве случаев нет возможности так организовать испытания, чтобы получить экспериментальные данные по надежности необходимого вида и в достаточном объеме. Обычно задача заключается в том, чтобы оценить показатели надежности по тому статистическому материалу, который имеется. На характер статистики существенное влияние оказывают: число изделий, подвергаемых испытаниям; порядок контроля функционирования в процессе испытаний (наблюдений); порядок восстановления (замены) изделий; порядок поступления изделий на испытания; критерий окончания испытаний (наблюдений).

Перечисленные факторы могут существенно варьироваться в зависимости от конкретных условий, например:

- испытания проводятся на одном изделии или группе изделий;
- контроль непрерывный, либо периодический, либо только в начале и в конце испытаний;
- испытания с восстановлением (заменой) отказавших изделий либо без восстановления;
- одновременное испытание всех изделий либо неодновременное;
- испытания до отказа всех изделий, либо до фиксированного числа отказов, либо до истечения фиксированного времени (наработки).

Различные сочетания этих факторов являются причиной большого разнообразия реальных стратегий испытаний на практике.

В настоящее время общеприняты следующие условные обозначения основных факторов испытаний: N — число изделий; U — отсутствие замены или восстановления; R — замена отказавших изделий; M — восстановление отказавших изделий; T — испытания (наблюдения) оканчиваются по истечении фиксированного отрезка времени (наработки); r — испытания (наблюдения) оканчиваются по достижении фиксированного числа реализаций (отказов, восстановлений).

В этих обозначениях конкретная стратегия испытаний обычно записывается сочетанием трех соответствующих символов, например $[NUT]$, $[NRT]$ и т.д. При этом предполагается, что изделия подвергаются испытаниям одновременно и контроль осуществляется непрерывно. Поскольку на практике эти условия зачастую не выполняются, дополнительно используются следующие обозначения для реальных стратегий испытаний.

Если изделия поступают на испытания неодновременно или снимаются с испытаний в произвольные моменты по каким-либо посторонним причинам, то такие нежесткие стратегии обозначаются так же, но

закрываются не в квадратные, а в круглые скобки. Если при испытаниях контроль производится периодически, через определенные интервалы времени (наработки), то соответствующее условное обозначение заключается в двойные скобки (круглые или квадратные), например $((NUT))$ — испытываются N изделий, отказавшие изделия не заменяются и не восстанавливаются, контроль производится периодически, испытания оканчиваются по истечении фиксированного отрезка времени (наработки), изделия могут поступать на испытания или сниматься с испытаний по каким-то причинам в произвольные моменты времени.

При любых планах могут быть три типа случайных величин:

- наработки до отказа (между отказами, до предельного состояния, от начала до конца восстановления, время хранения до отказа) (т. наз. полные реализации);
- безотказные наработки (неполные реализации);
- при отсутствии непрерывного контроля – наработки к моментам обнаружения отказов (условные реализации).

Особенности оценивания различных составляющих надёжности. Проблемы оценки безотказности рассматриваются подробно ниже. При оценке долговечности проблемы те же, но отягощённые большими значениями показателей (могут исчисляться годами). Сохраняемость оценивается в два этапа: сначала проводят (или имитируют) внешние воздействия в течение заданного интервала хранения, а затем проводят проверку безотказности, чтобы убедиться, что изделие как-нибудь неявно не испортилось. Специфика оценки ремонтпригодности состоит только в возможности внесения искусственных неисправностей, что сокращает время испытаний.

4.2. ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДОСТОВЕРНОСТИ ИСХОДНОЙ СТАТИСТИКИ

Проблема обеспечения полноты и достоверности исходной статистики занимает особое и очень важное место в испытаниях на надёжность. Сразу же отметим, что здесь и далее будем говорить о достоверности статистики не в математическом смысле (малая по объёму статистика менее достоверна, большая - более достоверна), а в смысле соответствия зафиксированных в ходе испытаний статистических данных действительному объёму наработки, фактическому количеству и характеру имевших место неисправностей и ремонтов. Именно неполнота (пробелы, неточности или прямые искажения зафиксированных данных) является главным источником недостоверности статистики в интересующем нас смысле. Исходя из этого аспекта достоверности, специалисты-практики часто говорят: «Статистику нужно собирать своими руками». Важность проблемы определяется тем, что неполноту и недостоверность исходной статистики уже нельзя скомпенсировать при обработке никакими расчетными формулами.

Организация сбора статистики. Так как статистику обычно получают из «чужих рук», что характерно для испытаний сложных изделий, от исследователя требуется четкая организация процесса сбора данных и постоянный контроль за ним. Это особенно необходимо в связи с тем, что вся статистика по надёжности собирается «вручную» и, кроме счетчиков наработки, в распоряжении исследователей практически пока нет никаких средств объективной регистрации параметров функционирования изделия. Поэтому существует обширный круг организационных вопросов, существенно влияющих на достоверность оценок. Изложенные далее рекомендации относятся прежде всего к государственным испытаниям опытных образцов сложных изделий с применением РЭМ, предъявляющим максимальные требования к достоверности статистики. В других случаях — на предварительных испытаниях, в условиях подконтрольной эксплуатации и т. п. — возможны другие варианты.

Первым среди указанных вопросов является вопрос о создании и организации группы оценки надёжности.

Группа оценки надёжности. Это коллектив специалистов, предназначенный для организации и повседневного руководства испытаниями на надёжность, а также для обработки и анализа их результатов. В состав группы обычно входят представители разработчика и заказчика. Такое двустороннее представительство в наибольшей степени обеспечивает объективность информации о надёжности изделия. Количественно состав группы может достигать до 4—6 человек (по 2—3 специалиста с каждой стороны). Рассмотрим функциональные обязанности группы надёжности.

Организация сбора первичных данных состоит прежде всего в определении объектов сбора статистики (ОСС), т. е. в определении перечня отдельных устройств и групп устройств, по которым должен вестись дифференцированный учет наработки и неисправностей. Так как в сложных изделиях широко используются автономное и групповое включение, резервирование и многоканальное построение устройств, а счетчики наработки устанавливаются не всегда и не на каждом устройстве, правильный выбор ОСС подчас является далеко не простой задачей. При слишком мелком делении изделия на ОСС усложняется учет, увеличивается число учетных документов (журналов), которые приходится вести одному испытателю, что неизбежно ведет к снижению достоверности статистики. При чрезмерном укрупнении ОСС возникает объективная опасность ошибочного «распространения» наработки всего изделия (или какой-либо из подсистем) на устройства, которые в силу своей специфики фактически в данный период часть времени не работали. Оптимальным, как показывает практика, следует считать случай, когда каждый испытатель ведет только один журнал учета, в котором фиксирует статистику по одному или нескольким ОСС.

Важным является установление персональной ответственности за ведение каждого журнала. Обычно журнал закрепляется за одним из испытателей — представителем заказчика. Если в испытаниях участвует достаточное количество разработчиков, то за ними закрепляют соответствующие ОСС и вместе с представителями заказчика они несут ответственность не только за грамотную эксплуатацию изделия, но и за качество ведения учетной документации по надежности. Такая двусторонняя ответственность наилучшим образом обеспечивает полноту и достоверность статистики, так как при этом требовательность (даже естественная придирчивость) заказчика сочетается с глубоким знанием техники разработчиком и столь же естественным стремлением показать ее достоинства.

Инструктивно-методическая подготовка испытателей — следующий и совершенно обязательный этап в работе группы оценки надежности. Практика показывает, что и при наличии продуманных инструкций групповые и индивидуальные занятия с испытателями, и даже прием от них зачетов по основным положениям методики являются эффективным средством повышения качества первичного статистического материала.

Контроль за соблюдением правил проведения испытаний — важнейшая функция группы. Она осуществляется обычно путем поочередного дежурства членов группы на объекте в течение всего периода испытаний. Желательно, чтобы дежурили попарно представители заказчика и разработчика. При проведении же специальных экспериментов (например, при проверках на взаимозаменяемость, при введении искусственных неисправностей для оценки времени восстановления или проверки качества резервирования и т. п.) двустороннее представительство членов группы является обязательным.

В процессе самого дежурства контроль со стороны членов группы тесно переплетается с оказанием ими помощи обслуживающему персоналу в анализе возникших неисправностей и фиксации данных о них в учетных документах, т. е. выливается практически в личное участие в работе по сбору статистики. Такая форма контроля наиболее близка к формуле «своими руками». Однако она не всегда осуществима. Поэтому практически всегда необходима периодическая проверка (не реже одного раза в неделю) правильности ведения учетных документов на всех ОСС с отметками в них о выявленных недостатках.

Опечатыванию устройств как эффективному средству исключения бесконтрольного вскрытия и ремонта изделия необходимо уделять особое внимание. Если на объекте постоянно находится дежурный член группы надежности, то устройства опечатывают печатью группы. В этом случае каждое вскрытие производится только в присутствии и с разрешения дежурного члена группы. При периодическом контроле со стороны группы надежности разрешается вскрытие по усмотрению испытателей, а нарушение печатей является для группы надежности сигналом о том, что в аппаратном журнале должна быть соответствующая запись. При невозможности организовать постоянное дежурство или достаточно частый контроль группы надежности, устройства опечатываются печатью представителя заказчика. Опечатывание служит сильным дисциплинирующим фактором для представителей обеих сторон — и разработчика, и заказчика, и не создает каких-либо существенных неудобств для работы, на которые обычно ссылаются противники этой меры.

Согласование статистики предполагает, как известно, получение согласованного заключения о характере, причине и классификации каждой неисправности прежде всего по степени влияния на работоспособность изделия («отказ» или нет) и по другим классификационным признакам. Согласование проводится обычно на трех уровнях:

- а) первичное согласование на ОСС между испытателями от заказчика и от разработчика (изготовителя) – это специалисты по технике, но не по надёжности;
- б) согласование в группе оценки надёжности, где специалисты по надёжности контролируют (в двустороннем порядке) правильность первичной классификации и полноту сведений, а также разрешают спорные вопросы;
- в) согласование в Комиссии по испытаниям, куда выносятся, как правило, только те вопросы, по которым не удается прийти к согласованному решению на первых двух уровнях.

Совершенно очевидно, что процесс согласования статистических данных проходит тем успешнее, чем оперативнее он осуществляется, т. е. если он проводится «по горячим следам», а не откладывается на конец испытаний, когда уже трудно восстановить по памяти недостающую информацию.

Учетные документы. Их формы являются важной предпосылкой получения полной и достоверной информации о надёжности. В практику многих организаций прочно вошли две формы: аппаратный журнал (АЖ) и карточки учета неисправностей (КУН). Там, где при профилактике приходится делать много замеров и записей, к ним добавляются журналы профилактических работ. Там, где часты неисправности сбойного характера (цифровая техника, связь и т. п.), целесообразно применять также специальные карточки (журналы) для учета сбоев. Возможны, естественно, и другие формы, отражающие специфику изделия. Рассмотрим один из вариантов комплекта АЖ и КУН.

Аппаратный журнал представляет собой журнал учета наработки, числа включений и неисправностей аппаратуры (левая часть разворота), а одновременно и рабочий дневник испытателя (правая часть). Пример заполнения такого журнала приведен на рис. 4.2.1 и 4.2.2. Он служит первичным документом, в котором непрерывно в течение всех испытаний отражается состояние аппаратуры в каждый момент времени, все работы, проводимые на ней, а также все замечания обслуживающего персонала по качеству функционирования техники. Рабочие записи в АЖ служат ещё и основанием для заполнения КУН, а также для разработки предложений по устранению выявленных недостатков.

Совмещение функций выгодно отличает АЖ от часто применяемых специальных журналов, предназначенных только для ведения статистики по надёжности. Во-первых, совмещенный журнал всегда под рукой у испытателя, и уже одно это способствует полноте информации. Во-вторых, в рабочем дневнике такого журнала содержится множество сведений, необходимых для работы персонала, по которым можно уточнять и восстанавливать данные о неисправностях, даже если в левой части они отсутствуют.

Карточка учета неисправности составляется по данным АЖ с привлечением другой информации (в том числе из ремонтных органов) и содержит как бы небольшой, но достаточно полный протокол по каждой неисправности. Карточки являются основными документами, с помощью которых проводятся статистический анализ и расчеты надёжности как в ходе испытаний, так и после их окончания. Карточки бывают сводные, содержащие сведения обо всех неисправностях изделия (или его части) за определенный период, и разовые, содержащие сведения об одной неисправности. Разовая карточка (рис. 4.2.3) имеет ряд достоинств, повышающих достоверность информации:

- а) возможность согласования классификации неисправности и связанного с этим дописывания, уточнения и дополнения сведений в карточке, в том числе с использованием оборотной стороны листа;
- б) возможность передачи карточки с отказавшей частью изделия (узлом, блоком) в ремонтную мастерскую для внесения данных по анализу и ремонту отказавшего узла;
- в) возможность сортировки карточек по разным признакам при согласовании и обработке;
- г) возможность размещения более подробных указаний по заполнению бланка благодаря применению надписей на обложке, а не на самой карточке (рис. 4.2.3). Если эти преимущества почему-либо не имеют значения, то разовая и сводная карточки применимы в равной степени.

Дата, время (ч, мин)		Наработка (ч, мин)		Момент обнаружения неисправности	Время восстановления (ч, мин)		Номер карточки
включения	выключения	за данное включение	от начала испытаний (эксплуатации)		поиска	устранения	
<i>Наработка на 1.01</i>		328					
<i>2 января</i>							
9.20	9.30	0.10	328.10	11.15	0	0	5/15
10.00	13.10	3.10	331.20	12.41	0.02	Самоустранилось	2/7
<i>3 января</i>							
8.30	11.40	3.10	334.30	8.35	1.40	0.22	2/8
21.10	21.50	0.40	335.10				
<i>Итого за январь</i>							
<i>по системе в целом</i>		127.30	455.30				
<i>по У-1</i>		90.00	418.00				
<i>по У-2</i>		75.30	403.30				

Рис. 4.2.1. Левая страница аппаратного журнала

**Рабочие записи обслуживающего персонала.
Характер обнаруженных неисправностей**

8.10 - Контроль функционирования. Все в норме.

8.20 - Тренировка операторов. Устройства У-1 и У-2 не включались.

10.12. Автом. переход на резерв У-5. Нет информации по 3 и 7 разрядам.

11.40 — закончен ремонт У-5 (см. апп. журнал У-5).

12.00 — конец тренировки.

12.05 — проверка производительности системы (п. 11 программы). Сбои в информации по 2-му каналу. В 12.43 самоустранились. 12.50 - Конец работы по программе испытаний.

12.55 - Контроль функционирования. Нет информации по 2-му каналу. Отключается питание устройства У-2. Остальная аппаратура в норме.

13.10 — тренировка операторов от имитатора с 1, 3, 4 и 5-м каналами. На 2-м — ремонт.

13.34 — закончен ремонт У-2 (пробой С45, сгорели R2, R4, R5) .

Конденсатор С45 — К50-3Б-50-2000 в штатном ЗИП не предусмотрен, взят из отладочного ЗИП.

14.30 - Конец тренировки. У-7 вскрыто для замены реле по перечню доработок № 0018.

16.40 - Контроль после доработки. Нормально.

Рис.4.2.2. Правая страница аппаратного журнала

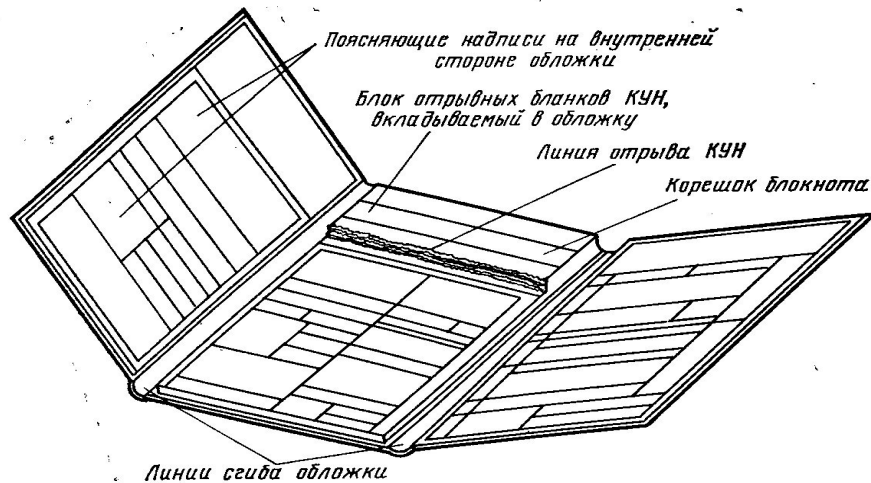


Рис. 4.2.3. Блокнот карточек учёта неисправностей

Общие правила проведения испытаний на надежность являются необходимой предпосылкой получения достоверных данных о надежности изделия. Ниже мы остановимся кратко на тех правилах, которые в наибольшей степени влияют на качество исходной статистики и нарушения которых являются характерными ошибками в работе по оценке надежности сложных изделий.

Ошибки в классификации неисправностей. Эти ошибки, пожалуй, наиболее распространены, и это обусловлено как трудностями правильной интерпретации тех или иных классификационных признаков в конкретной ситуации, так, нередко, и ведомственными интересами. Второй причины мы касаться не будем (обусловленные ею ошибки устраняются согласованием статистики), первую же рассмотрим более внимательно.

Для оценки показателей надежности из всех неисправностей прежде всего выделяют те, которые привели к отказу изделия (части изделия, ОСС). Отказом считается снижение и тем более полная утрата изделием работоспособности. Затем из зафиксированных отказов выделяют те, которые не должны учитываться при оценке показателей. В настоящее время принят во многих организациях и стандартизован в широких масштабах список неучитываемых отказов, приведённый в начале данного раздела.

Не всегда просто бывает, например, отличить нарушение инструкции обслуживающим персоналом (категория «в») от естественной (и уж, конечно, незлонамеренной) его ошибки, обусловленной эргономическим несовершенством изделия или недостатками самой ИЭ. Решающим признаком при этом является наличие в ИЭ прямых указаний о запрещении тех или иных действий, а также наличие предупредительных надписей и защитных средств самого изделия (блокировок, ограждений и т. п.). Нельзя, например, исключать из расчета отказ оптической системы, вызванный тем, что оператор в ходе работы задел ее и нарушил юстировку.

Распространенной ошибкой, касающейся отказов категории «г», является преждевременное, не подтвержденное достаточной статистикой, исключение из расчетов отказов, по которым проведены доработки. Сразу после доработки такие отказы можно «списывать» только в том случае, когда доработка исключает возможность их появления в принципе (например, ненадежный узел полностью исключается из состава изделия). Если же доработки направлены на улучшение ненадежного элемента, то имевшие место до доработки отказы исключаются из расчетов лишь после экспериментальной проверки эффективности принятых мер, длительность которой определяется в каждом конкретном случае испытательной комиссией.

К категории «д» часто относят все отказы, которые были обнаружены во время профилактики, хотя их появление и не было связано с применением методов прогнозирования. Эту ошибку мотивируют тем, что профилактика якобы и предназначена для выявления таких «скрытых» отказов. Подобное представление принципиально неверно: профилактика должна выявлять не уже случившийся отказ, а лишь потенциальный, т. е. тот, который может произойти в ближайший межпрофилактический период.

Данная ошибка приводит к тому, что из расчетов исключаются отказы, случайно совпавшие по времени с профилактикой, тогда как в наработку изделия время профилактики входит. Однако гораздо

более серьезные последствия имеют место тогда, когда на испытаниях реальная работа изделия имитируется эпизодически и не полностью, контроль в остальное время далек от идеального, а контроль во время профилактики является самым полным и всеобъемлющим. Тогда невыявленные отказы накапливаются в межпрофилактический период, обнаруживаются во время профилактики и исключаются из расчета, что существенно завышает все оценки.

К этой же категории пытаются иногда отнести отказы элементов изделия, если их наработка на момент отказа превышает срок службы (ресурс), указанный в ТУ на них. Ссылки на частные ТУ можно привлекать лишь для обоснования тех или иных мероприятий, включаемых в профилактику изделия. Если даже замена отработавших свой срок элементов предусмотрена инструкцией по эксплуатации, речь не идет об уже случившихся отказах.

Исключение из расчетов самоустранившихся неисправностей. Наиболее частой причиной такого исключения является, конечно, неполнота, а подчас и полное отсутствие данных о таких неисправностях в учетных документах, объясняемые обычно трудностями их регистрации. Это особенно неоправдано, когда не регистрируется самоустранившаяся в процессе поиска «адреса» неисправность, например, контактного характера (которая может продолжаться часами), и только потому, что она самоустранилась. Другим вариантом является исключение самоустраниющихся неисправностей из расчета под тем предлогом, что они «не требуют ремонта», путем установления соответствующего определения понятия «отказ». При этом полностью игнорируется простой изделия на время поиска неисправности.

Сбои ЭВМ – отдельный вид самоустраниющихся неисправностей. Для выявления причин частых сбоев ЭВМ наибольшую пользу приносит именно полная и объективная статистика по ним. В этих целях оказывается весьма эффективным применение в период испытаний специальных программ и автоматических регистрирующих приборов (самописцев, фотокамер и т. п.), подключаемых дополнительно к обычно имеющимся средствам контроля.

Потери информации о самоустраниющихся неисправностях могут возникать и при плохом взаимодействии группы оценки надежности с группами анализа характеристик назначения испытываемого изделия. Например, если при анализе сопровождения самолета радиолокационной станцией из расчета показателей точности сопровождения исключаются участки трасс с явно большими «отскоками» координат, то эти участки должны быть проанализированы группой надежности. И если в это время на аппаратуре даже не было замечено никаких нарушений работоспособности (в силу неидеальности системы контроля), то такие явления следует вносить в статистику по надежности в виде отказа либо сбоя ЭВМ.

Неправильный хронометраж. Бывает, что время отыскания отказавшего устройства в системе не включается во время восстановления этого устройства, особенно когда неисправность в системе ищут одни люди (с точностью до устройства), а в устройстве — другие. Эти последние и заполняют карточку.

Объединение нескольких отказов в один. Если инженерным анализом установлена взаимная зависимость отказов (а зависимые отказы исключаются из расчета), то при определении показателей надежности вся эта группа принимается за один (присоединяется к первичному отказу). Исключение из расчетов времени, затраченного на устранение вторичных отказов, является грубой ошибкой. Время устранения «объединенного» отказа должно включать в себя полное время, затраченное на ремонт изделия.

Аналогично следует поступать и тогда, когда зависимость неисправностей установить не удастся, но они обнаружены одновременно в одном устройстве. Было бы ошибкой учитывать каждую неисправность в отдельности. Очевидно, что для данного устройства все они образуют одну неисправность с общим временем восстановления.

На испытаниях бывают перемежающиеся неисправности, которые успевают вызвать несколько самоустранившихся отказов изделия, прежде чем их обнаружат и устранят. Таковы, например, нарушения контактов в паяных или разъемных соединениях. Часто встречаются попытки объединить все эти отказы на том основании, что они вызваны одной общей причиной. Ясно, что такого рода объединение (даже с суммированием времени восстановления) недопустимо искажает действительную картину функционирования изделия.

Наконец, самой грубой ошибкой в этой группе является объединение нескольких неисправностей одинакового характера (вида), хотя и обнаруженных в разное время и даже в разных образцах одинаково-

вых устройств (например, в однотипных блоках периодически отказывают выходные транзисторы усилителя мощности). В такой ситуации одинаковый характер неисправностей никак не может служить основанием для объединения нескольких повторяющихся отказов в один.

Внесение поправок на квалификацию персонала. Речь идет о попытках уже после того, как при устранении какой-то неисправности зафиксировано время восстановления, уменьшить его потому, например, что испытатель считается недостаточно опытным, или увеличить потому, что неисправность устранял высококвалифицированный разработчик (или два техника вместо одного, предусмотренного штатом). Поскольку обоснованной методики пересчета времени восстановления на другие условия пока не существует, все это ведет к субъективным искажениям опытных данных. А чтобы избежать такого рода искажений, следует соблюдать определенные правила при эксплуатации изделия. Испытатели должны пройти необходимый курс обучения и сдать зачеты по этому курсу. Их количество и квалификация должны строго соответствовать инструкции на изделие. Разработчиков можно допускать к устранению неисправностей на ранних стадиях испытаний (заводские, предварительные), а на последних стадиях привлекать только в особо сложных ситуациях.

Отклонения от установленной стратегии ремонта. Это проявляется чаще всего в отказе от штатных запасных инструментов и принадлежностей (ЗИП) и ремонтного оборудования, а также в нарушении установленного в ИЭ порядка восстановления изделия. Например, вместо замены отказавшего блока запасным и последующего его ремонта на стенде предпринимают ремонт блока непосредственно на месте. Ремонт изделия при этом существенно удлиняется и усложняется. Это особенно характерно для предварительных испытаний, непосредственно следующих за этапом отладки, на котором разработчик пользуется неограниченным запасом отладочного ЗИП, более совершенными лабораторными приборами и способен устранять неисправности без стендов как создатель этого изделия. По инерции такой порядок ремонта сохраняется иногда и после начала испытаний. При этом оправдываются стремлением сохранить ЗИП для последующих испытаний, нехваткой людей и времени для освоения стендов и т. п. В связи с этим необходимо подчеркнуть, что вся стратегия ремонта, предложенная разработчиком в эксплуатационной документации, вместе с ремонтным оборудованием и ЗИП является таким же объектом испытаний, как и само изделие.

Отклонения от установленных методов профилактики. На испытаниях опытных образцов возможны отклонения как в сторону сокращения, так и в сторону расширения объема профилактики по сравнению с инструкцией. С одной стороны, часть предусмотренных работ может не проводиться просто из-за дефицита времени, с другой — при проведении профилактики параметры, находящиеся в пределах допусков, могут «выставляться в номинал», хотя в инструкции и нет указаний об этом. Несложные подрегулировки иногда делают и в межпрофилактические периоды, как только обнаруживается хоть какой-то уход параметра от номинала. Опыт показывает, что все эти действия могут как повышать, так и понижать надежность изделия. Поэтому статистика, полученная в этих условиях, может сильно отличаться от данных, которые будут получены в эксплуатации при реализации штатной (по ИЭ) системы профилактики.

4.3. ОПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫЕ ИСПЫТАНИЯ

4.3.1. Общие положения. Определения

Напомним, что определительные испытания проводятся с целью экспериментально определить ПН изделия. Результатом этих испытаний являются так называемые точечные и интервальные оценки ПН. Точечные оценки показывают наиболее вероятный уровень ПН, а интервальные оценки – это мера точности эксперимента. Последнее очень важно именно для надёжности, т.к. оценка параметров случайного процесса отказов и восстановлений связана с огромными (по сравнению с оценками других технических параметров) ошибками. Интервальные оценки характеризуются доверительными границами, ещё их называют доверительными интервалами.

4.3.2. Точечные оценки

Оценка считается состоятельной, если с увеличением объёма наблюдений она сходится к истинному значению ПН. Оценка считается несмещённой, если её математическое ожидание равно истинному значению ПН (это означает отсутствие систематической ошибки). Оценка считается эффективной, если она обладает наименьшей (по сравнению с другими возможными оценками) дисперсией. Ясно, что лучше всего применять несмещённые, состоятельные и эффективные оценки, но это не всегда удаётся. Ниже приводятся наилучшие оценки для наиболее распространённых простых случаев. Оценки ПН будем обозначать знаком *.

ПН вида P, биномиальный план NUT (так называемая схема Бернулли).

- Оценка для $P^* = m/N$, где m – число успешных реализаций, N – число попыток.
- Оценка для Kz^* , $K\phi^*$ и др. – то же.

Пример. 24.04.1979 8 вертолётов РН-53 вылетели на операцию по освобождению американских заложников в Тегеране (Иран). Во время полёта возникло 3 отказа (вертолёты №№ 2,5,6). Оценка $K\phi^* = 5/8 = 0,62$.

ПН вида T, экспоненциальное распределение.

Оценка: $T^* = T_s/r$, T_s – суммарная наработка, r – число отказов.
 $\lambda^* = 1/T^*$.

Применение РЭМ, любые ПН. Оценка определяется как функция $R = F(X^*_1, X^*_2 \dots X^*_n)$, где $X^*_1, X^*_2 \dots X^*_n$ – оценки показателей составных частей изделия, входящие в общую формулу.

Например, $Kz^* = T^*/(T^*+T_в^*)$.

4.3.3. Интервальные оценки

Доверительным интервалом называется интервал, покрывающий неизвестную истинную величину с заданной вероятностью γ . Интервал может быть односторонним, тогда это нижняя или верхняя граница оцениваемого показателя. Реально двусторонний интервал образуется двумя односторонними, только его доверительная вероятность γ определяется как разность $1 - \gamma_1 - \gamma_2$, где γ_1 и γ_2 относятся к односторонним интервалам.

Для биномиального распределения, ПН вида P – формулы очень сложны, поэтому доверительный интервал определяют по номограмме Приложения Б (п. Б2).

Для экспоненциального распределения, ПН вида T (или λ):

- Верхняя граница: планы NUN, NUr, NRr : $\lambda_в = \chi^2_{1-\varepsilon, 2n}/2T_s$; ($\varepsilon = (1-\gamma)/2$)
планы NUT, NRT : $\lambda_в = \chi^2_{1-\varepsilon, 2n+2}/2T_s$;
- Нижняя граница для всех планов: $\lambda_н = \chi^2_{\varepsilon, 2n}/2T_s$.

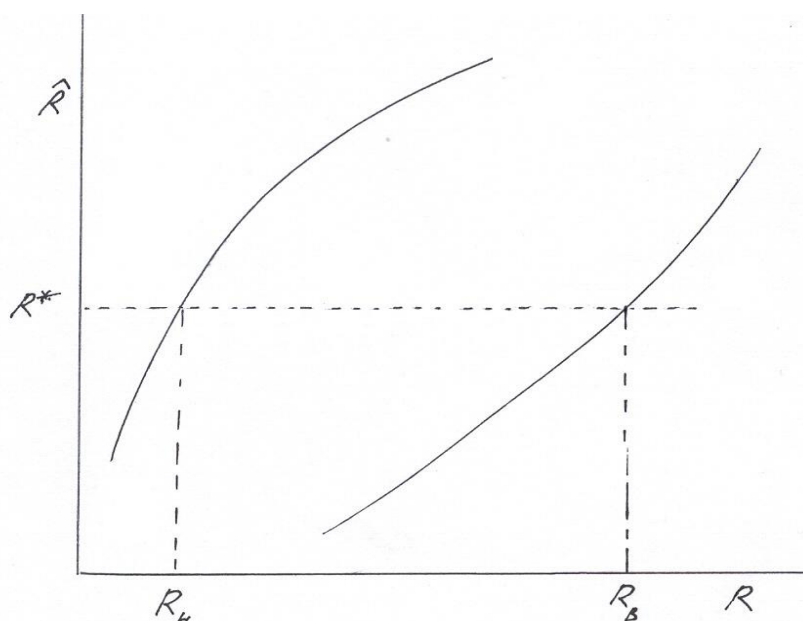


Рис. 4.3.1. Доверительная область для общего метода

Строится доверительная область в координатах «реальная надёжность - оценка на испытаниях» следующим образом. Для некоторого значения «реальной» надёжности R (точки на оси абсцисс), вычисляют максимальные и минимальные значения \hat{R} - это значения оценки, которые могли бы реализоваться на испытаниях при данном значении «реальной» надёжности. Расчёты повторяют для нескольких точек R (это обычно делается на ЭВМ), чтобы можно было провести две линии – границы доверительной области (рис. 4.3.1).

Чтобы теперь найти доверительные границы для ПН изделия, достаточно провести горизонтальную прямую на уровне R^* , полученном на испытаниях на самом деле. Абсциссы её пересечений с границами доверительной области и будут искомыми доверительными границами R_n и R_b для ПН изделия.

4.4. КОНТРОЛЬНЫЕ ИСПЫТАНИЯ

4.4.1. Общие положения. Определения

Как указывалось ранее, цель контроля (контрольной процедуры) — установить, соответствует ли изделие заданным требованиям. Результатом контроля является решение о соответствии или несоответствии изделия требованиям (приемка или браковка изделия). На языке математической статистики задача контроля показателя надежности формулируется как задача проверки гипотез о его значениях. Все изложенное в этой главе относится к случаю, когда показатель надежности R возрастает с надежностью (например, T или $P(t)$).

Если в технической документации указано требуемое значение показателя R_{Tp} , то при разработке контрольной процедуры стремятся обеспечить приемку изделий с уровнем надежности $R > R_{Tp}$ и браковку изделий с уровнем надежности $R < R_{Tp}$. На рис. 4.4.1 показана зависимость вероятности приемки изделия L от его надежности R , называемая оперативной характеристикой плана контроля.

Идеальная оперативная характеристика показана на рис. 4.4.1 жирной линией. Однако практически она недостижима, так как требует бесконечного объема наблюдений (времени наблюдений, числа образцов, опытов и т. п.). Реальная оперативная характеристика представлена тонкой линией. Вводят два уровня контролируемого показателя надежности: приемочный R_0 и браковочный R_1 и оговаривают значения $L(R)$ в этих точках. При этом считается, что изделия с уровнем надежности $R > R_0$, безусловно, приемлемы для потребителя и должны приниматься с достаточно высокой вероятностью не

ниже $L(R_0)$, а изделия с уровнем $R < R_1$ неприемлемы и должны с вероятностью не ниже $1 - L(R_1)$ браковаться. Вероятностями противоположных событий $\alpha = 1 - L(R_0)$ и $\beta = L(R_1)$,

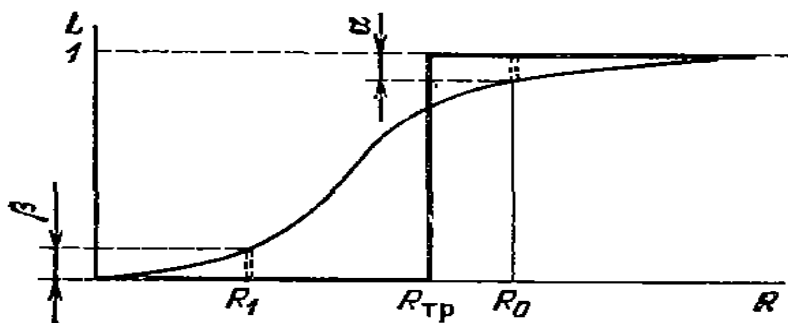


Рис.4.4.1. Оперативная характеристика $L(R)$.

т. е. вероятностями ошибочных выводов, принято характеризовать степень уверенности контролеров в правильности принимаемых решений. Вероятности α и β называются рисками поставщика и потребителя соответственно. Все они для наглядности сведены в таблицу 4.4.1. Таким образом, проверка гипотезы $R > R_{тр}$ против гипотезы $R < R_{тр}$ заменена проверкой гипотезы $R > R_0$ против гипотезы $R < R_1$.

Таблица 4.4.1

Фактический уровень	Вероятности ошибочных решений	
	при приёмке	при браковке
соответствие	-	α
несоответствие	β	-

Как видно из рис. 4.4.1, величины α и β характеризуют максимально возможные вероятности ошибок в областях $R > R_0$ и $R < R_1$ соответственно. Это позволяет проверку сложных гипотез $R > R_0$ и $R < R_1$ заменить проверкой простых гипотез $R = R_0$ и $R = R_1$. Контроль, обеспечивающий заданные риски в этих точках, обеспечит такие же и меньшие риски в областях $R > R_0$ и $R < R_1$.

Четыре числа R_0 , R_1 , α и β определяют две точки оперативной характеристики, что при выбранной процедуре контроля (одноступенчатая или последовательная), в свою очередь, определяет план контроля, включая объем наблюдений V . Объем V является единственным ограничением, не позволяющим произвольно уменьшать риски и сближать приемочный и браковочный уровни. Поэтому при планировании контроля следует выбирать R_0 , R_1 , α и β таким образом, чтобы использовать имеющиеся возможности, не выходя за их пределы. На различных этапах разработки, производства и эксплуатации изделий эти возможности различны, поэтому указанные параметры целесообразно выбирать на стадии разработки программы испытаний для соответствующего этапа.

Размещение интервала $[R_1, R_0]$ относительно заданного значения $R_{тр}$ при $\alpha = \beta$ должно выбираться с учетом ущерба, наносимого потребителю приемкой плохих изделий и поставщику браковкой хороших. Если ущерб потребителя сопоставим с ущербом поставщика, интервал $[R_1, R_0]$ размещается симметрично около $R_{тр}$ так, чтобы $L(R_{тр}) \sim 0,5$. Если ущерб потребителя невелик по сравнению с ущербом поставщика, интервал $[R_1, R_0]$ смещают влево вплоть до крайнего положения, когда $R_0 = R_{тр}$. При обратном соотношении (ущерб поставщика мал по сравнению с ущербом потребителя) интервал смещается вправо (крайнее положение $R_1 = R_{тр}$). Вообще говоря, точки с координатами R_1 и R_0 справедливо выбирать как точки равного ущерба (для поставщика и потребителя).

Ниже рассматривается случай, когда контролируемый показатель надежности является одномерной величиной типа наработки или вероятности.

Важно иметь в виду (как говорилось выше), что если для изделия нормировано несколько таких показателей надежности (многомерный показатель), то применение обычных методов к каждому из них обеспечивает для изделия в целом совершенно не те риски, которые обеспечиваются для отдельных показателей (риск поставщика намного больше, а риск потребителя меньше).

Наблюдаемые риски. Поскольку при планировании контроля нет априорной информации, любое планирование рассчитывается на наихудший (с точки зрения различения гипотез R_0 и R_1) результат, т. е. средний, неопределенный, близкий к середине между R_0 и R_1 . Однако реальный результат R после окончания наблюдений может заметно изменять уверенность в правильности принятого решения. Принятые для планирования риски характеризуют только план контроля и не могут служить мерой этой уверенности, поэтому после контроля вместо них целесообразно использовать так называемые наблюдаемые риски:

после браковки наблюдаемый риск поставщика α^* — вероятность результата, который не лучше реально полученного R^* , при условии $R = R_0$;

после приемки наблюдаемый риск потребителя β^* — вероятность результата, который не хуже реального R^* , при условии $R = R_1$.

В отличие от наблюдаемых обычные планируемые риски α и β определяются до испытаний. Отметим, что и те и другие риски являются условными вероятностями — при условиях $R = R_0$ или $R = R_1$. Поскольку α и β относятся к гипотетическому наихудшему результату наблюдений, а α^* и β^* — к реальному, имеют место соотношения $\alpha^* \leq \alpha$ и $\beta^* \leq \beta$.

Контроль показателей надежности может производиться и без предварительного планирования объема наблюдений, когда контроль надежности совмещается с испытаниями изделий по другим параметрам или с эксплуатацией изделий. Этот случай рассмотрен в п. 4.4.3.

Организация контрольных испытаний. В процессе разработки больших систем контроль надежности проводят как минимум один раз на приемочных испытаниях, зачастую используя также статистику предварительных и других испытаний. При серийном производстве контроль надежности обычно вводят в состав периодических испытаний и проводят раз в несколько лет. Иногда контроль надежности изделий организуют как отдельный вид испытаний. Контроль надежности больших сложных изделий с широким применением резервирования может быть включен даже в состав приемочно-сдаточных испытаний, поскольку большой объем получаемой статистики и применение расчетно-экспериментального метода позволяет проводить контроль ПН, совмещая его с другими проверками и практически не увеличивая общее время испытаний.

4.4.2. Одноступенчатый контроль по оценочному нормативу

В данном параграфе описываются планы контроля показателей типа наработки и вероятности для наиболее распространенных случаев. Кроме того, излагаются общий метод одноступенчатого контроля и метод определения наблюдаемых рисков после контроля.

Одноступенчатый контроль показателей типа наработки. Рассмотрим контроль показателей типа T для случая, когда наработка между отказами имеет экспоненциальное распределение. Продолжительность контроля ограничена некоторым предельным временем (наработкой). Для выбора плана контроля абсолютные значения уровней $R_0 = T_0$ и $R_1 = T_1$ несущественны, план определяется лишь их отношением T_0/T_1 и рисками α и β . Для некоторого упрощения контрольной процедуры приемку (браковку) в данном случае принято проводить не по уровню самого контролируемого показателя надежности, а по связанному с ним числу возникших отказов.

В процессе контроля наработки на отказ фиксируется суммарное по всем N контролируемым образцам изделия число отказов r , а также суммарная наработка $\sum t_i$, где t_i — наработка i -го образца (наработки образцов могут быть различными). План контроля представляет собой пару чисел: браковочное число отказов $r_{бр}$ и предельную суммарную наработку t_{max} . Контроль прекращается, как только будет достигнуто одно из этих значений. Если первым достигается $r = r_{бр}$, то изделие бракуется; если первым достигается t_{max} , то изделие принимается.

План выбирается по таблице Приложения Б (п. Б3). Поскольку число отказов дискретно, при заданных рисках отношение T_0/T_1 , соответствующее точному решению задачи, также принимает дискретные значения.

Если отказавшие изделия не заменяются и не восстанавливаются, число образцов для достижения той же суммарной наработки при той же общей продолжительности контроля следует увеличить на величину ΔN , чтобы суммарная наработка дополнительных образцов скомпенсировала потери наработки отказавших. В среднем $\Delta N = t_{max}/T$, где T — ожидаемое реальное значение показателя надежности изделия; во всяком случае, ΔN не превышает $r_{\text{оп}} - 1$.

Иногда используется вариант контроля, продолжительность которого ограничена некоторым заранее вычисленным числом отказов $r_{\text{пред}}$: планы $[NUr]$ и $[NRr]$. По достижении этого числа отказов

подсчитывается суммарная наработка контролируемых образцов t_{Σ} и определяется точечная оценка наработки на отказ $T^* = t_{\Sigma}/r_{\text{пред}}$. Если T^* не менее оценочного норматива C , изделие принимается, если менее — бракуется. Очевидно, что после достижения наработки $t_{\Sigma} = C r_{\text{пред}}$ продолжать контроль не имеет смысла — приемка гарантируется. Таким образом, контроль следует продолжать либо до заданного числа отказов $r_{\text{пред}}$, если $t_{\Sigma} < C r_{\text{пред}}$ (при этом изделие бракуется), либо до указанной наработки $t_{\Sigma} = C r_{\text{пред}}$, если $r < r_{\text{пред}}$ (при этом изделие принимается). Это соответствует плану $[NR r_{\text{пред}} t_{\Sigma}]$ или $[NUr_{\text{пред}} t_{\Sigma}]$ и полностью эквивалентно контролю, описанному выше.

При распределении наработки между отказами (до отказа), отличным от экспоненциального, а также при более сложных планах испытаний (усеченные выборки) для планирования одноступенчатого контроля T следует применять общие методы [7].

Одноступенчатый контроль показателей типа вероятности. Контроль производится так: поскольку показатель надежности представляет собой вероятность некоторого события A , то организуется N независимых опытов по осуществлению этого события и в каждом опыте фиксируется результат: успех, если событие A имело место, и неуспех (отказ, срыв) в противном случае. Например, при контроле $P(t)$ в каждом опыте фиксируется, проработало ли изделие безотказно время t ; при контроле K_2 фиксируется, работоспособно ли изделие в выбранный момент времени (прямой экспериментальный метод). После N -го опыта изделие принимается, если суммарное число отказов не больше заранее вычисленного оценочного норматива $r_{\text{оп}}$, и бракуется в противном случае. Таким образом, план контроля представляет собой пару чисел $N, r_{\text{оп}}$. План определяется по заданным P_0, P_1, α и β с помощью таблицы Приложения Б (п. Б4).

Опыты могут проводиться как на одном, так и на нескольких (до N) образцах изделия при условии, что независимость опытов обеспечена. Независимость опытов при контроле различных ПН обеспечивается по-разному.

Если контролируется показатель $P(t)$ и распределение времени безотказной работы изделия экспоненциальное, то организовать N циклов работы длительностью t можно с любым числом образцов от 1 до N . При таком распределении можно считать, что в каждом цикле изделие работает как новое, очередной цикл можно начинать сразу же после окончания предыдущего (или после ремонта, если был отказ), поскольку «предыстория» изделия в данном случае не имеет значения. Если же распределение существенно отличается от экспоненциального или оно неизвестно, то каждый цикл необходимо проводить с отдельным образцом, т. е. всего необходимо N образцов.

Если контролируется K_2 , то контроль сводится к организации N проверок работоспособности изделия в случайные моменты времени. Проверки одного и того же образца должны быть разнесены по времени (интервал между проверками должен быть больше среднего времени безотказной работы и восстановления изделия).

При контроле $K_0(t)$ должны выполняться все требования, необходимые для контроля K_2 и $P(t)$.

Пример 4.1. Определить план контроля надежности гальванических элементов, если заданы два уровня вероятности безотказной работы $P(t)$, $t = 20$ ч: $P_0 = 0,98$ и $P_1 = 0,96$, а также риски α и β (по 0,1).

Решение. По таблице п. Б4 для заданных P_0, P_1, α и β находим $N = 473$ и $r_{\text{оп}} = 14$. Это означает, что для контроля необходимо организовать 473 цикла работы изделия длительностью 20 ч каждый. Контроль прекращается либо при возникновении 14-го отказа решением о браковке изделия, либо по окончании 473-го цикла решением о приемке, если к этому моменту число зафиксированных отказов было меньше 14. Поскольку элемент, отработавший 20 ч, не может считаться новым (неэкспоненциальное распределение), для контроля необходимо 473 элемента.

4.4.3. ОДНОСТУПЕНЧАТЫЙ КОНТРОЛЬ ПО ДОВЕРИТЕЛЬНЫМ ГРАНИЦАМ

Если имеются удобные формулы (способы) для вычисления доверительных границ $R_в(R^*, V)$ и $R_н(R^*, V)$, одноступенчатый контроль заданного ПН может быть проведён на основе этих границ. Применение доверительных границ не меняет необходимого объёма наблюдений по сравнению с обычным одноступенчатым контролем. Оценочный норматив также сохраняется, приняв, однако, другую форму. Планирование сводится к решению системы

$$R_в(1-\alpha)(R^*, V) = R_0; \quad (4.1)$$

$$R_н(1-\beta)(R^*, V) = R_1. \quad (4.2)$$

Значения R^* и V , удовлетворяющие этим уравнениям, совпадают с оценочным нормативом C и требуемым объемом V , которые используются при одноступенчатом контроле (п. 4.4.2). Это справедливо по крайней мере для случая, когда доверительные границы $R_в(R^*, V)$ и $R_н(R^*, V)$ монотонны по R^* и по V (сближаются при увеличении V и возрастают при увеличении R^*). Найденное значение R^* можно использовать как оценочный норматив C в обычной форме.

Из изложенного следует, что если известны формулы или таблицы планов обычного одноступенчатого контроля, их можно использовать для определения требуемого объема контроля по доверительным границам, не решая системы (4.1, 4.2). И наоборот, если таких формул нет, но есть способ вычисления доверительных границ, то система (4.1, 4.2) позволяет определить план обычного контроля, включая оценочный норматив.

Определение наблюдаемых рисков после контроля. Планируемые до наблюдений риски α и β в качестве меры ошибочности принятых решений не различают лучших и худших изделий, так как не зависят от результата наблюдений. После контроля, когда этот результат известен, более целесообразно в качестве такой меры использовать наблюдаемые риски α^* и β^* :

$$\alpha^* = P\{R < R^* | R_0\}; \quad \beta^* = P\{R > R^* | R_1\}, \quad \text{где } R^* \text{ — результат наблюдений.}$$

Напомним, что $\alpha = P\{R < C | R_0\}$, $\beta = P\{R > C | R_1\}$, т. е. и те и другие риски относятся к гипотетическим изделиям с $R = R_0$ или $R = R_1$, но планируемые риски относятся еще и к гипотетическому результату наблюдений C , наихудшему с точки зрения различения гипотез R_0 и R_1 . Поскольку в случае приемки заведомо $R^* \geq C$, то $\alpha^* \leq \alpha$, в случае браковки $R^* \leq C$ и $\beta^* \leq \beta$ (см. рис. 4.4.1).

Использование наблюдаемых рисков не меняет принимаемых решений о приемке (браковке), но может существенно изменить представление о достаточности объема наблюдений, по которым принималось решение, и о достоверности последнего. Оно позволяет различать лучшие и худшие изделия среди принятых, разделять их по сортам и т. п.

Наблюдаемый риск поставщика α^* определяется из соотношения

$$R_в(1-\alpha^*) = R_0. \quad (4.3)$$

т. е. подбором доверительной вероятности $\gamma = 1 - \alpha^*$ верхняя граница одностороннего доверительного интервала контролируемого показателя совмещается с приемочным уровнем R_0 , и определяется α^* .

Наблюдаемый риск заказчика β^* определяется из аналогичного соотношения (4.4)

$$R_н(1-\beta^*) = R_1. \quad (4.4)$$

Пример 4.2. Заданы два уровня наработки на отказ: T_0 и $T_1 = T_0/2$, $\alpha = \beta = 0,1$. Проверяются восстанавливаемые изделия с экспоненциальным распределением наработки между отказами. При контроле одной партии изделий зафиксировано 13 отказов, при контроле другой 9. Обе партии принимаются; однако несомненно, что во втором случае вероятность ошибки существенно меньше. Проанализируем результаты испытаний.

По табл. п. Б3 определяем план одноступенчатого контроля: $T_{исп} = 9,47 T_0$ и $r_{бр} = 14$ (поэтому партии и принимаются). Однако условие (4.3) выполняется для первой партии при $\beta^* = 0,1$, а для второй - при $\beta^* = 0,01$. Обычный же подход позволяет утверждать только одно: риск β (планируемый) в обоих случаях равен 0,1; партии формально одинаковы. Отметим, что первая партия по числу отказов отличается от второй существенно больше, чем даже от партии с числом отказов $r = 14$, которая была бы уже забракована.

Контроль без предварительного планирования. Рассмотрим случай, когда объем наблюдений определяется организационно-техническими соображениями: используются все экспериментальные данные, позволяющие увеличить статистику, пригодную для контроля. Так, при испытаниях опытных образцов изделий контроль надежности может частично (и даже полностью) совмещаться с проверками других показателей и проводится по статистике, накопленной в ходе этих проверок. Аналогичная задача возникает и тогда, когда контроль планируется, но после окончания плановых наблюдений появляется возможность продолжать накопление данных — такую возможность всегда желательно использовать. Объем наблюдений может не быть известным заранее: например, при контроле надежности в ходе эксплуатации изделий используется наработка подконтрольных образцов за отчетный период (квартал, год) — величина случайная, меняющаяся зачастую в очень широких пределах.

В указанных условиях по окончании наблюдений можно применить обычную процедуру планирования, подбирая риски так, чтобы расчетный объем наблюдений V был равен фактическому. Целью этой процедуры является вычисление оценочного норматива C , чтобы принять решение о приемке или браковке. Подобранные таким образом риски α (или β) могут использоваться в качестве меры ошибочности решения как верхняя граница наблюдаемых рисков. Однако, поскольку наблюдения уже закончены, естественнее в качестве этой меры использовать непосредственно α^* и β^* , определив их согласно (4.3, 4.4).

Другим способом решения задачи является контроль с помощью доверительных границ. Процедура контроля состоит в следующем. Когда наблюдения по той или иной причине прекращаются, по накопленной статистике определяют доверительный интервал $[R_n, R_g]$, подбирая γ_1 и γ_2 так, чтобы выполнялось одно из условий:

$$R_n(\gamma_2) = R_l, \quad R_g(\gamma_1) > R_0; \quad (4.5)$$

$$R_n(\gamma_2) < R_l, \quad R_g(\gamma_1) = R_0. \quad (4.6)$$

Меняя γ_1 и γ_2 , следует соблюдать заранее выбранное соотношение между ними (рекомендуется $\gamma_1 = \gamma_2$). При увеличении γ_1 и γ_2 доверительный интервал сужается, а при уменьшении — расширяется (с обеих сторон). Если при некоторых γ^*_1 и γ^*_2 выполняется (4.5), т. е. доверительный интервал левой границей совмещается с левой границей заданного интервала $[R_l, R_0]$, оставаясь шире последнего (рис. 4.4.2), то выносится решение о приемке и определяется наблюдаемый риск потребителя: $\beta^* = 1 - \gamma^*_2$. Если выполняется (4.6), т. е. интервалы совмещаются правыми границами (рис. 4.4.2), то выносится решение о браковке и определяется наблюдаемый риск поставщика: $\alpha^* = 1 - \gamma^*_1$. Таким образом, если доверительный интервал смещен вправо от заданного, изделие принимается, если влево — бракуется. Очевидно, что при согласованном изменении γ_1 и γ_2 выполняется одно, и только одно, из условий (4.5, 4.6). Строгого совмещения границ интервалов не требуется. Необходимо лишь их смещение; полное перекрытие одного другим должно быть исключено. Если они смещены ещё больше, чем надо (вправо от 4.5 - для приёмки, влево от 4.6 – для браковки), то наблюдаемые риски будут меньше.

Пример 4.3. Испытан один образец восстанавливаемого изделия с экспоненциальным распределением наработки между отказами. Установлены два уровня наработки на отказ: T_0 и $T_1 = T_0/2$; вероятности ошибок должны быть одинаковы: $\gamma_1 = \gamma_2$. Нарботка t_Σ за время испытаний составила $4T_0$, число отказов $z = 2$. Требуется решить вопрос о соответствии или несоответствии изделия заданным требованиям и указать наблюдаемый риск.

Решение. Используя соответствующие формулы расчета доверительных границ из приложения Б, записываем условие (4.5) в виде уравнений:

$$\chi^2_{\gamma^*(2r+2)} = 4 t_\Sigma / T_0; \quad \chi^2_{1-\gamma^*(2r)} < 2 t_\Sigma / T_0;$$

и условие (4.6) в виде уравнений:

$$\chi^2_{\gamma^*(2r+2)} > 4 t_\Sigma / T_0; \quad \chi^2_{1-\gamma^*(2r)} = 2 t_\Sigma / T_0.$$

Пользуясь таблицей χ^2 - распределения, легко видеть, что в условиях данного примера удовлетворяется условие (4.5), причем $\gamma^* = 0,985$.

Таким образом, выносится решение о приемке изделия (наблюдаемый риск потребителя $\beta^* = 0,015$).

Посмотрим, как меняются решения и риски в условиях данного примера при различном числе отказов r :

$r = 0$; тогда $T_n = T/2$ при $\gamma^* > 0,999$, а $T_e = \infty$. Изделие принимается при $\beta^* < 0,001$;

$r = 1$; $T_n = T/2$ при $\gamma^* = 0,995$, $\beta^* = 0,005$, $T_{e0,995} = 80T_0$;

$r = 2$; как мы уже видели, $\beta^* = 0,015$, $T_{e0,985} = 22T_0$;

$r = 3$; $T_n = T/2$ при $\gamma^* = 0,95$, $\beta^* = 0,05$, $T_{e0,95} = 4,9T_0$;

$r = 4$; $T_n = T/2$ при $\gamma^* = 0,90$, $\beta^* = 0,1$, $T_{e0,90} = 2,3T_0$;

$r = 6$: начиная с этого значения, выполняется условие браковки (4.6). $T_{в\gamma^*} = T_0$ при $\gamma^* = 0,8$.

Тогда $\alpha^* = 0,2$, а $T_{н(0,8)} = 0,44T_0 < T_1$.

$r = 7$; $T_{в\gamma^*} = T_0$ при $\gamma^* = 0,87$, $\alpha^* = 0,13$, $T_{н(0,87)} = 0,36T_0$, и т.д.

Отметим, что максимальные значения наблюдаемых рисков равны 0,2. Как и следовало ожидать, они соответствуют числу отказов 5 и 6, т.е. результатам, при которых различить гипотезы T_0 и T_1 труднее всего. Легко убедиться, что если бы объём контроля был запланирован заранее, и исходя из него потребовалось бы подобрать план обычного контроля, то этот план был бы именно таким: $t_{\Sigma} = 4T_0$, $r_{бр} = 6$.

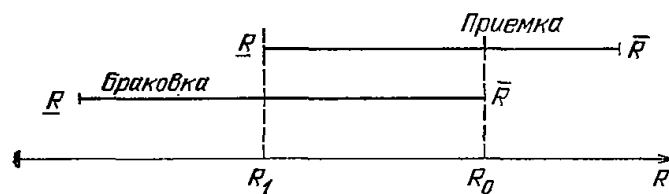


Рис.4.4.2. Положение интервалов при браковке и приемке

4.4.4. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫЙ КОНТРОЛЬ

Последовательная процедура позволяет принять решение (о приёмке или браковке) сразу же, как только определится соответствие или несоответствие изделия заданным требованиям. Технически это выглядит так: заранее фиксируются особым образом подобранные границы приёмки и браковки, в процессе наблюдений ведётся специфическая линия, определяемая отказами (и, возможно, восстановлениями); при пересечении линией границы приёмки выносится решение о приёмке; при пересечении границы браковки – решение о браковке; в обоих случаях испытания прекращаются. Если изделие по надёжности намного лучше или хуже заданных требований, такая процедура сокращает объём испытаний по сравнению с одноступенчатым методом. Разработан венгром Абрахамом Вальдом в USA в 1945-47 гг.

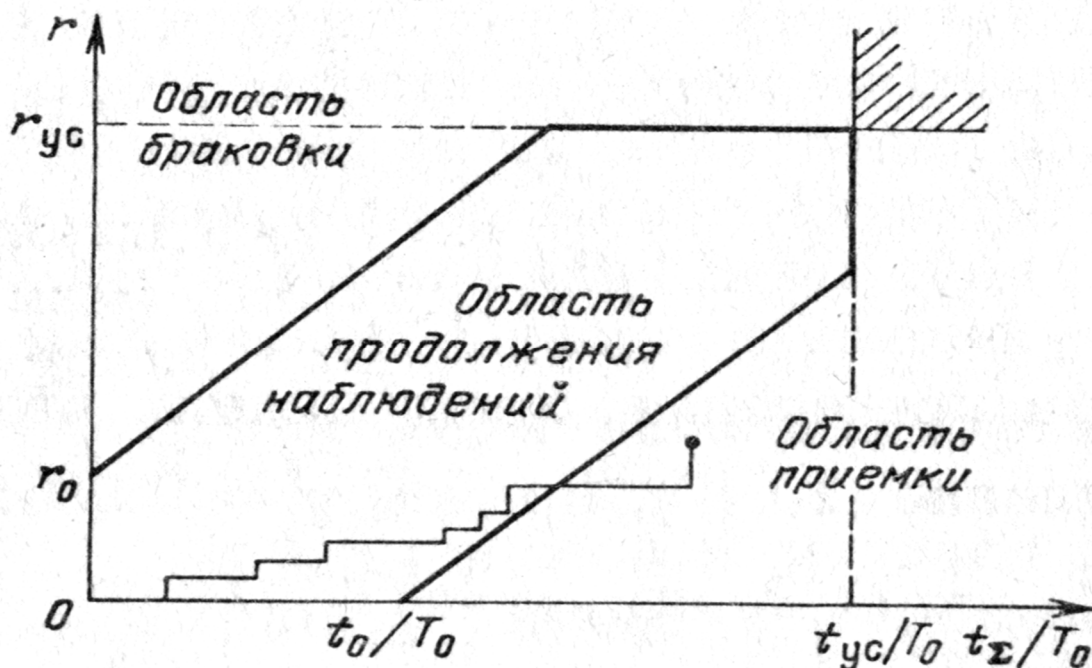


Рис. 4.4.3

Последовательный контроль показателей типа наработки. Экспоненциальное распределение. В процессе контроля фиксируются суммарная наработка по всем наблюдаемым образцам и суммарное число отказов. Приемка и браковка производятся на основании числа отказов. Изделия могут восстанавливаться (заменяться) или не восстанавливаться. Планирование состоит в построении двух границ областей приемки и браковки в системе координат «наработка — число отказов». Положение этих границ в указанных координатах не зависит от абсолютных значений T_0 и T_1 , а полностью определяется их отношением. В ходе контроля на рисунке с заранее заготовленными границами строится ступенчатый график числа отказов как функции суммарной наработки. В момент каждого очередного отказа принимается одно из трех решений:

приемка, если функция $r(t)$ находится в области приемки; браковка, если функция $r(t)$ находится в области браковки; продолжение наблюдений, если функция $r(t)$ находится в промежуточной области — области продолжения наблюдений.

Границы областей приемки и браковки представляют собой две бесконечные параллельные прямые линии.

Продолжительность последовательного контроля случайна, поэтому требуемый объем наблюдений может и превысить объем, достаточный для одноступенчатого контроля. В связи с этим используют усечение последовательного контроля. Для этого ограничивают число отказов и суммарную наработку значениями r_{yc} и t_{yc} , причем по достижении r_{yc} при $t < t_{yc}$ изделие бракуется, а по достижении t_{yc} и при $r < r_{yc}$ — принимается. Однако это приводит к некоторому возрастанию рисков α и β , оценки которого известны только для «классического» контроля Вальда при контроле показателя типа «наработка» и экспоненциальном распределении.

Таким образом, результирующие (с учётом усечения) границы областей

Таким образом, результирующие (с учетом усечения) границы областей приемки и браковки представляют собой ломаные линии, состоящие каждая из двух отрезков (см. рис. 20.3).

Уравнения наклонных прямых: $r = at/T_0 + r_0$ — граница области браковки; $r = a(t/T_0 - t_0/T_0)$ — граница области приемки, где r_0 и t_0/T_0 — точки пересечения прямых с осями координат.

Численные значения констант a , r_0 и t_0/T_0 определяются по табл. 20.3 как функции заданных значений α , β и отношения T_0/T_1 . В таблице приведены константы как для значений T_0/T_1 , соответствующих точным решениям задачи одноступенчатого контроля, так и для округленных значений, чаще применяемых на

практике.

Если $\alpha = \beta$, то $r_0 = at_0/T_0$ и уравнения прямых имеют вид $r = at/T_0 \pm r_0$.

Отметим, что наклон прямых (коэффициент a) зависит только от отношения T_0/T_1 и не зависит от рисков.

Уровень усечения последовательного контроля следует выбирать, учитывая, с одной стороны, организационно-технические возможности, а с другой — связанное с усечением возрастание рисков α и β . Возрастание рисков $\Delta\alpha$ и $\Delta\beta$ тем меньше, чем дальше (по наработке, по числу отказов) проводится усечение.

На практике можно рекомендовать усечение на уровне $1,5 - 2,5 r_{бр}$.

Отметим, что требуемое для данного метода условие — принятие решения только в момент очередного отказа — не позволяет сразу принять изделие при пересечении границы зоны приемки, а требует продолжения наблюдений по крайней мере до очередного отказа. В момент отказа ломаная $r(t)$ может вернуться в зону продолжения контроля, и в дальнейшем процесс может пойти как угодно.

Последовательный контроль показателей типа вероятности. Если показатель надежности представляет собой вероятность некоторого события A , то контроль этого показателя $P\{A\}$ организуется в виде ряда опытов по осуществлению этого события. В каждом опыте фиксируется результат: успех, если событие A имело место, и неуспех (отказ, срыв) в противном случае. После каждого опыта на основе общего числа опытов N и числа зафиксированных отказов r проверяется выполнение условий приемки, браковки, или продолжения наблюдений. Это делается с помощью графика, аналогичного представленному на рис. 20.3, но в координатах N, r (рис. 20.4). Контроль прекращается, как только ступенчатая функция $r(N)$ пересечет границу области приемки или браковки.

Законы распределения случайных величин, определяющих контролируемый показатель надежности, не имеют значения, поскольку независимо от них оценка имеет биномиальное распределение. Контроль может проводиться как на одном, так и на нескольких образцах изделия при условии независимости опытов

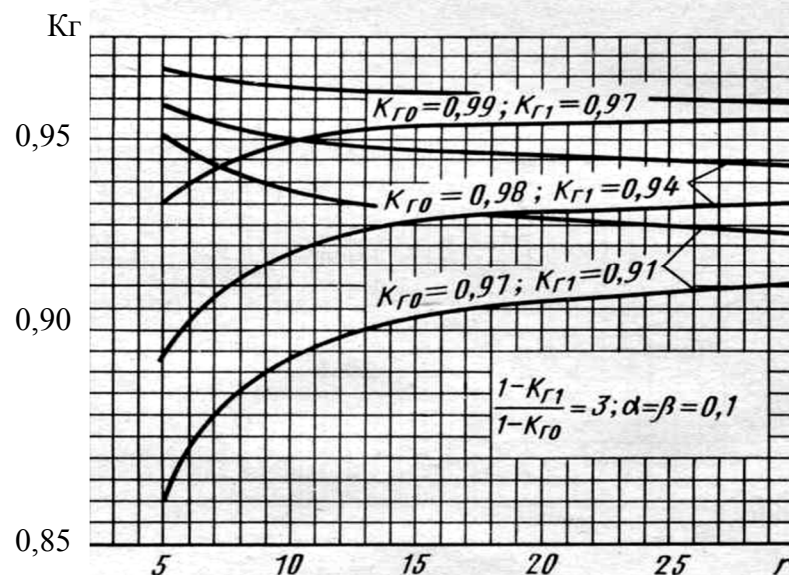
Если $\alpha = \beta$, то $r_0 = aN_0$ и уравнения прямых имеют вид $r = aN \pm r_0$.

4.4.5. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫЙ КОНТРОЛЬ КОЭФФИЦИЕНТА ГОТОВНОСТИ

Испытаниям подвергается одно или несколько изделий. Распределения наработки между отказами t и времени восстановления τ экспоненциальные. Если изделие одно, то оценка K_2 производится после каждого восстановления. Если изделий несколько, статистика суммируется по всем экземплярам, но по каждому — только до последнего восстановления включительно. Расчет K_2^* производится по формуле:

$$K_2^* = T^*/(T^* + T_v^*),$$

после чего проверяется, в какую область на графике попадает значение K_2^* . Типичный график для трёх планов приведён в приложении Б8. Графики для других планов приводятся в [Y,Z].



Интересно отметить, что при контроле K_2 решение можно принять, только начиная с некоторого определённого количества отказов. Можно ожидать, что подобное ограничение существует и для других комплексных показателей (видимо, нужно набрать некоторый минимум статистики по времени восстановления).

4.5. СПЕЦИФИКА РАСЧЁТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО МЕТОДА

РЭМ позволяет испытывать сложные системы с применением резерва и другими особенностями, в том числе с резервом, в неполном составе, в режиме постоянных доработок техники и программ, и в таких условиях ему нет равных (другие методы вообще неприменимы).

Преимущество РЭМ при испытаниях резервированных групп на первый взгляд не нуждается в специальных доказательствах. Поскольку надежность группы может быть во сколько угодно раз больше надежности отдельных устройств, входящих в нее, ясно, что для испытаний устройств при той же точности и достоверности может потребоваться во сколько угодно раз меньше времени. Однако нужно еще убедиться, что использование данных по устройствам в последующих расчетах не сводит на нет этот выигрыш, и вообще хорошо бы подтвердить столь многообещающий вывод цифрами.

Сравним два варианта испытаний группы из двух одинаковых устройств — основного и резервного [1]. В первом варианте группа рассматривается как целое, в расчете учитываются только совпадающие отказы двух устройств. Во втором варианте статистика набирается суммарно по двум устройствам, учитываются отказы каждого из них. Выигрыш во времени будем характеризовать K_y — отношением T_{u1} и T_{u2} , т. е. наработок, обеспечивающих одинаковую точность в первом и втором вариантах соответственно. Приведем результаты расчетов.

а. Нагруженный резерв 1:1 с восстановлением и полным контролем; показатель надежности — наработка на отказ. Тогда

$$K_y = T/5T_в, \quad (4.5.1)$$

где T и $T_в$ — наработка на отказ и среднее время восстановления отдельного устройства.

График зависимости (4.5.1) приведен на рис. 4.5.1.

б. То же, но показатель надежности — коэффициент оперативной готовности $K_{ог}$. В первом варианте здесь применяется КЭМ — $K_{ог}$ для группы вычисляется по оценкам $T_{гр}^*$ и $T_в гр^*$. Тогда выигрыш почти такой же, формула отличается незначительно. Не исключено, что это отличие — лишь следствие принятых приближений.

в. Нагруженный резерв с восстановлением и неполным контролем резерва. Показатель — T . Тогда

$$K_y = \frac{T}{2 \left(2T_в + (1 - \eta) \tau_k + \frac{T^2}{2T_в + (1 - \eta) \tau_k} \right)} \quad (4.5.2)$$

где η — полнота непрерывного контроля резерва; τ_k — среднее время, на которое задерживается обнаружение отказа, не обнаруженного непрерывным контролем.

График функции (4.5.2) для разных вариантов контроля резерва показан на рисунке 4.5.2, из которого видно, что выигрыш уже не такой большой.

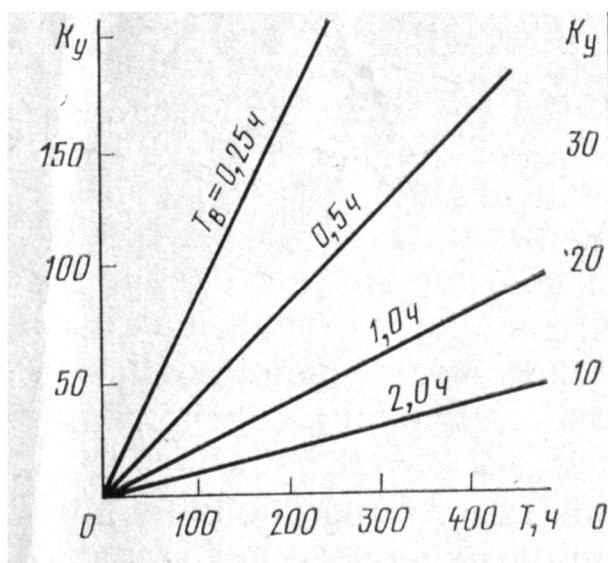


Рис.4.5.1

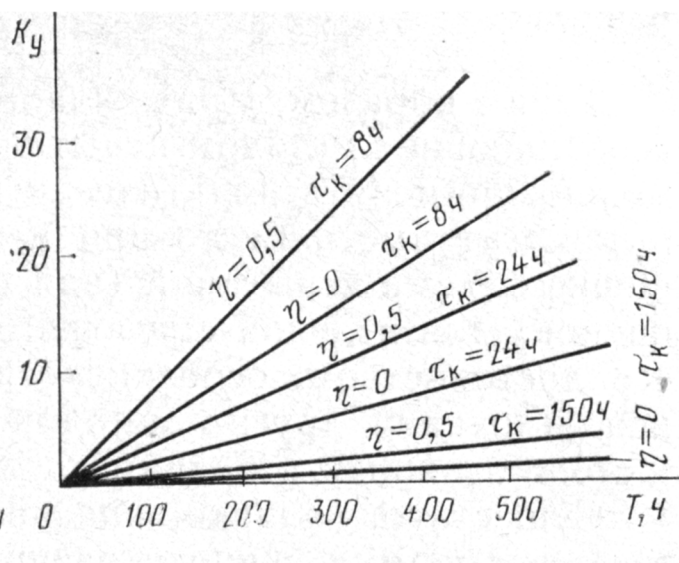


Рис. 4.5.2

Отметим, что рассмотренные формулы приблизительно соответствуют естественному предположению о том, что РЭМ сокращает время испытаний в $NT_{гр}/T$ раз, в том числе в $T_{гр}/T$ раз за счет того, что группа надежнее отдельного устройства, и ещё в N раз за счет того, что РЭМ использует статистику с N (основных и резервных) устройств вместо одного. Однако эта идея нуждается в дополнительном обосновании.

Отметим ещё, что на испытаниях изделий, включающих в себя нерезервированные устройства, выигрыш от применения РЭМ заметно снижается. Естественно, здесь все определяется соотношением показателей надежности резервируемой и нерезервируемой частей. Например, в сложном вычислительном комплексе, где задублированы все устройства, кроме пульта управления, наличие последнего может существенно увеличить время испытаний. Дело в том, что при планировании испытаний приходится использовать функции распределения оценки показателя, имеющие максимальную дисперсию. В данном случае дисперсия максимальна тогда, когда все отказы сосредоточены именно в нерезервируемой части изделия. Поскольку это противоречит практике (без резерва остаются как раз самые надежные устройства), приходится для планирования привлекать дополнительную априорную информацию, позволяющую ограничить надежность этой части изделия снизу. Поскольку эти ограничения могут быть далекими от истинных, выигрыш от РЭМ может быть не очень большим.

5. СПЕЦИФИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ

5.1. ПОСТАНОВКА СПЕЦЗАДАЧ

Существует ещё множество задач, связанных с надёжностью. Здесь нет возможности рассмотреть их все. Поэтому ограничимся кратким перечислением этих задач и ссылками (фамилиями специалистов, их решающих).

Ускоренные испытания. Известно, как трудно и дорого проводить испытания на надёжность. Иногда даже ясно, как можно ускорить возникновение отказов и тем сократить время наблюдений (например, нагреть изделие в камере). Проблемой здесь является вопрос: во сколько раз это воздействие ускоряет процесс? По этой теме можно рекомендовать работы Г.Д.Карташова, И.В.Павлова.

Оптимальное техобслуживание. Это выбор оптимальных сроков проведения плановых профилактических работ. Учитывается прибыль, полученная за единицу времени исправной работы, затраты при наличии скрытого отказа, затраты при проведении плановой предупредительной профилактики, затраты при проведении планового профилактического ремонта и внепланового аварийно-профилактического ремонта, интенсивность отказов изделия. Определяется оптимальный период проведения профилактических работ, максимизирующий (минимизирующий) выбранный критерий качества функционирования системы. По этой теме можно рекомендовать работы В.А.Каштанова.

Оптимизация поиска неисправностей. Известно о существовании в системе одного отказа, известен список тестов и вероятности отказа каждого элемента системы. Необходимо выбрать некоторую группу тестов, достаточную для отыскания отказавшего элемента, и определить условный порядок последовательного применения тестов этой группы (программу поиска) так, чтобы среднее значение суммарной стоимости проведения процедуры поиска было минимальным. Стоимостью здесь может быть суммарное время поиска, объём программы поиска и проч. Тему разрабатывал И.А.Ушаков.

Мостики, сети. Есть системы, которые не сводятся к параллельно-последовательным схемам. Прежде всего, это системы связи – сигнал проходит самыми замысловатыми путями. Пример такой системы («мостик») приведён на рис. 5.1.1. В примере сигнал от А к D может пройти путями ABD, ACD, ABCD и ACBD. В этой области работает В.А.Нетес.

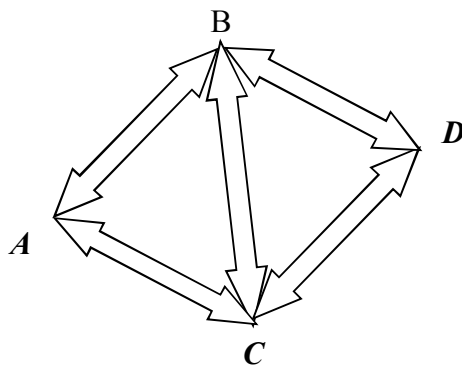


Рис. 5.1.1

Системы с временной избыточностью (с резервом времени, СРВ). В системе с резервом времени отказ ещё не означает срыва задания, так как в течение резервного времени она допускает восстановление. Отказом такой системы является событие, после возникновения которого система уже не успевает выполнить задание при данных условиях эксплуатации. При отказе системы может происходить обесценивание либо всей уже проделанной работы, либо какой-то её части, либо решение задачи только задерживается. Тему разрабатывает Г.Н.Черкесов.

Зависимые опыты. При оценках параметров типа вероятности (схема Бернулли) хорошо разработаны методы оценки в предположении, что опыты независимы. Зависимость опытов, очевидно, уменьшает полезный объём статистики, расширяет доверительные интервалы. Некоторые оценки для таких интервалов приведены в [1].

Спецсистемы. В ряде частных случаев возможны редкие и очень специфические структуры, для которых общие подходы категорически не годятся. К таким структурам относятся, например, фазированные антенные решётки, нефтепроводы, гидромеханические сооружения. Задача оценки каждой такой системы должна решаться отдельно самостоятельным квалифицированным специалистом.

Задачи оценки «надёжности программного обеспечения», надёжности оператора, связи надёжности и безопасности будут немного подробнее описаны ниже, поскольку эти вопросы достаточно распространены и актуальны. Задаче разработки комплектов запчастей (ЗИП) посвящено отдельное приложение А, поскольку она является необходимой в практике любого инженера-разработчика.

5.2. О «НАДЁЖНОСТИ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ»

В современных АСУ, использующих цифровые ЭВМ, очень велико количество так называемых «отказов сбойного характера», проявляющихся как остановы, зависания программы или просто неверные решения поставленных задач. Важный их признак: они не требуют ремонта и устраняются перезапуском конкретной программы, повторным решением задачи или даже перезагрузкой ЭВМ (рестартом), когда все задачи надо решать заново.

Известны четыре причины таких явлений:

- a) остаточные ошибки в программе;
- b) сбои аппаратуры;
- c) ошибки операторов;
- d) ошибочная информация, приходящая извне (по каналам связи).

подавляющая часть литературы по этому вопросу посвящена пункту a). Остальные упоминаются вскользь. Действительно, ошибка в операторе программы на Фортране (была пропущена запятая) привела к неудаче при первом запуске американского исследовательского корабля на Венеру. Ошибки в медицинском программном обеспечении явились причиной нескольких смертельных случаев, а ошибка в программе проектирования самолета вызвала несколько серьезных авиакатастроф.

Программная надёжность становится особо актуальной, когда программы являются самостоятельным изделием. В этом случае они изготавливаются, проверяются и подвергаются приёмосдаточным испытаниям почти так же, как обычные объекты». Однако к этому необходимо добавить, что программа должна ещё противостоять трём другим источникам отказов сбойного характера. Возникает понятие **«устойчивость ПО»**.

Устойчивость ПО определяет способность системы выполнять заданные функции в условиях действия помех (ошибок, сбоев, отказов), возникающих во внепрограммных источниках (см. выше п.п. b, c, d).

По поводу сбоев типа a): В России принято считать, что «надёжность есть свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования» (ГОСТ 27.002-87).

С этой точки зрения программы абсолютно надёжны. Пример – симфонии Моцарта, ведь партитура музыкального произведения – это программа для пианиста (оркестра). Носители программы меняются, но программа остаётся, не портится и не стареет – и так больше 200 лет (с 1791 года).

Вследствие множества значений входных сигналов ошибки программ проявляются случайным образом и в этом очень похожи на обычные отказы (неотличимы).

А вот в чём отказы из-за программных ошибок отличаются от отказов аппаратурных:

a) Вероятность их возникновения связана с условной вероятностью того, что программа содержит ошибку в данной части программы, и того, что изделие будет работать под управлением именно этой части программы.

b) Отказ аппаратурный зависит либо от времени, либо от объёма выполненной работы, а отказ программный – от того, с какой вероятностью программа выйдет на участок, содержащий ошибку.

в) Устранение аппаратурного отказа (заменой отказавшего элемента исправным) не означает, что такой же отказ не повторится при дальнейшей работе изделия, а обнаружение и устранение отказа программного (исправление программы) реально гарантирует, что такой отказ не повторится.

Современные методы разработки и проверки программ не обеспечивают создания идеальных программ даже при известных путях их улучшения. В практике программирования разработчику обычно трудно оценить несколько возможных решений. Проверка программы часто возможна лишь после объединения ее частей, когда изменения в программе связаны со значительными затратами времени и средств. Часто используются ранее составленные блоки программ, что также затрудняет оптимизацию данной программы. Не все блоки программируются одинаково тщательно и подробно, это обнаруживается обычно слишком поздно.

Реально программисты проводят поиск ошибки и усовершенствование программы только после появления отказа. Ошибка обычно считается исправленной, если при проведении повторной проверки она не проявилась и выпущено извещение о корректировке программы.

Наиболее сложными являются программы управления в реальном масштабе времени. Полная проверка таких программ в процессе отладки невозможна. Функционирование программы может быть

полностью оценено лишь в процессе применения. Ошибки программ обычно проявляются только при действии определенных входных сигналов. Большие управляющие программы обычно вообще уникальны. В начальный период эксплуатации они обычно работают в одном экземпляре и лишь после выявления и устранения подавляющего большинства ошибок, т. е. при достижении определенного уровня «надежности», могут в редких случаях тиражироваться.

Но, главное, есть ещё три других источника сбоев совершенно иной природы, и общих методов их снижения не существует. Нет возможности даже указать превалирующий источник, т.к. по своей интенсивности они обычно (для АСУ реального времени) сопоставимы. О них можно сказать немногое.

По поводу сбоев типа b): испытание АСУ на тестах, предназначенных для проверки аппаратуры, не позволяет даже набрать статистику по аппаратурным сбоям, т.к. хотя на тестах и создаются наиболее тяжёлые режимы, реальную работу техники тестами симитировать не удаётся. Пример: персональные компьютеры всегда начинают работу с тестов, которые почти всегда проходят успешно и которым никто не верит.

По поводу сбоев типа c): человеку свойственно ошибаться. Относительно легко обнаруживаются ошибки в коде вводимой команды (нажата не та кнопка или клавиша). Ошибки в логике ввода обнаружить труднее, здесь в программу надо вводить специальный контроль действий оператора, а каких именно – выясняется обычно в процессе работы или испытаний. Примером является вопрос: «Вы уверены, что хотите удалить этот файл?» Конечно, операторы должны быть обучены и действовать по инструкции, по мере накопления опыта ошибок всё меньше, но инструкции пишут тоже люди, да и текучесть кадров всё осложняет, и т.п.

Бывает и так, что люди сознательно вводят систему в непредусмотренный режим (например, что-то пробуют, проверяют идею). Так взорвали Чернобыльскую АЭС – полностью исправную систему. Причём в ходе неудачного опыта управляющий компьютер действовал как обычно и предотвратил ядерный взрыв, но не избежал водородного, которого никто не ожидал.

По поводу сбоев типа d): здесь очень велико разнообразие вариантов: в некоторых АСУ вообще не используется информация извне, или они не подключены к каналам связи; у некоторых - высококачественные каналы с помехоустойчивым кодированием сообщений, с переспросом и т.п.; в некоторых используются случайный набор каналов связи, имеющихся в данной местности (воздушные, тропосферные, радиорелейные, по-разному защищаемые). Кодирование и переспрос позволяют «отловить» большинство сообщений, искажённых помехами в канале, но некоторые из них всё же пропускают, и пропускают все неверные сообщения, возникшие у абонента (на другом конце канала).

Из сказанного следует вывод, что необходимо оценивать поток сбоев суммарно, не ограничиваясь сбоями одного происхождения. Для экспериментальной оценки можно применить уже упомянутое «условное устройство», нерезервируемое в принципе, и включаемое в схему расчёта надёжности АСУ последовательно со всей системой. Это позволяет решить методические вопросы, но технический анализ причин отказов сбойного характера облегчается незначительно. Реально могут быть найдены (и устранены) причины только некоторых и притом часто повторяющихся таких отказов.

Известен универсальный метод обнаружения сбоев различного происхождения – параллельная работа основной и резервной ЭВМ со сравнением результатов. Правда, при расхождении результатов надо ещё решить, какой результат правилен. У этого пути есть и другие недостатки.

Существует и универсальный метод защиты от сбоев любого происхождения – переход на резервную ЭВМ. При этом программа «откатывается» на некоторое время назад с использованием заранее заготовленной (и притом несколько устаревшей) информации. Информация заготавливается в форме так называемой «контрольной точки», т.е. комплекта данных, с которыми можно попытаться снова решить все необходимые задачи (различных частных задач, решаемых АСУ, в каждый момент времени, естественно, очень много). Контрольная точка периодически обновляется и передаётся в резервную ЭВМ. Отметим, что на это тоже требуются ресурсы ЭВМ, т.е. обеспечивается некоторое снижение её производительности. Если создавать контрольную точку слишком часто, это снижение будет недопустимым, а если редко – работа с «точки» отбросит систему слишком далеко назад и переход на резерв станет отказом АСУ. Поэтому формирование «контрольной точки» и периода её создания – непростая самостоятельная задача, требующая незурядных талантливых исполнителей.

Сам по себе переход на резерв тоже представляет собой некоторое потрясение для АСУ: надо как-то переключить на другую машину систему отображения (всех операторов), все каналы связи и прочее (кроме питания и вентиляции - они должны быть постоянно включены как для основной, так и для резервной машин).

В связи со всем этим переход ЭВМ на резерв желательно проводить как можно реже, т.е. по возможности обходиться без него. Поэтому программисты применяют все меры для обеспечения устойчивости своих частных программ и переход на резерв вызывают только в самых тяжелых ситуациях.

5.3. НАДЕЖНОСТЬ ОПЕРАТОРА ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

5.3.1. Проблема надежности человека-оператора

Человек, включенный в работу системы, рассматривается в инженерной практике как одно из звеньев общего контура управления или регулирования. Это означает, что эффективность и надежность целенаправленного функционирования любой системы с участием человека будет зависеть от того, насколько своевременно, точно и безошибочно, т.е. иными словами, надежно, станет выполнять свои функции человек-оператор. Поэтому важно знать, сколько времени оператор может выполнять необходимые действия с заданной точностью, как изменяется его надежность в течение рабочего дня, в каких условиях человек начинает работать ненадежно, какова причина его ненадежности.

Обеспечить высокую надежность системы без учета особенностей деятельности человека невозможно. Вместе с тем такой учет является очень трудной задачей. Если применить существующие методы оценки надежности к человеку, то создается впечатление, что он является весьма ненадежным звеном системы «человек-машина»: он не способен длительное время безошибочно выполнять одну и ту же работу (быстро утомляется), легко отвлекается, его поведение трудно предсказать, так как оно подвержено влиянию многих факторов.

Вместе с тем человек значительно лучше, чем любая существующая машина, может справиться с неожиданностями: он способен предвидеть ход событий, находить оптимальные решения в сложных ситуациях, перестраивать способ деятельности в новых условиях, учитывать дополнительные факторы, которые машина учесть не может. Создатели систем включают в них человека, чтобы обеспечить необходимую надежность.

Таким образом, с одной стороны, человек менее, а с другой стороны – более надежен, чем существующие машины. Поэтому напрашивается компромисс: всё, что машина может делать – ей и поручить, оставив человеку контроль результатов работы машины (основных решений), в особо важных случаях поручив ему утверждение решений; а всё, чего машина сделать не может – отдать оператору. Однако необходимо обеспечить оператора удобной, «дружественной» программой.

5.3.2. «Дружественные программы»

Можно перечислить некоторые универсальные меры, облегчающие работу оператора в АСУ:

- всплывающие подсказки;
- простейшие проверки (обязательно с описанием ошибки);
- контроль недопустимых, опасных действий (типа стирания файлов);
- русский язык, исключение англицизмов и американских сокращений;
- общепринятые сокращения и обозначения, понятные «иконки»;
- стандартный вызов справки (типа F1);
- резервное копирование информации (она портится при длительном хранении);
- упрощение программ, минимум функций.

В конкретных программах, естественно, возможно ещё множество приёмов, делающих программу «дружественной». Добросовестный программист вводит их всё больше по мере обнаружения слабых мест в программе. В то же время зачастую проще внести в ИЭ какой-нибудь категорический запрет и программу не менять. Конечно, оператора можно обучить любой программе, но редкие действия ему свойственно забывать, особенно после отпуска или болезни. Да и мало кто читает внимательно ИЭ, даже если надо сдать по ней зачёт.

5.4. НАДЕЖНОСТЬ И БЕЗОПАСНОСТЬ

В связи с тяжёлыми авариями последних десятилетий стала актуальной борьба за повышение безопасности технических систем и устройств. Эта работа связана с тем, что приходится рассматривать

не просто отказы, но отказы вместе с их последствиями. Действительно, классическая надёжность трактуется отказ лишь как невыполнение работы, тогда как отказ может нанести значительно больший ущерб.

Для решения задачи когда-то использовался так называемый метод FMEA (анализ отказов и их последствий). Метод не использует вероятностных оценок и остался в прошлом, как атавизм первых шагов науки о надёжности. Но вот теперь он, как выясняется, вновь вернулся к нам, теперь в сане большого достижения. Он уже и стандартизован на уровне ГОСТ.

FMEA применяется так: разработчик изделия перечисляет все отказы, которые возможны в принципе. Каждому из них он сопоставляет последствия отказа, например «поток высокотемпературного газа вызовет эрозию металла и, возможно, сквозной прогар бака и взрыв -- катастрофическое разрушение ускорителя - неудачный запуск - уничтожение изделия - гибель экипажа». Здесь наука кончается, и инженеры на основе интуиции и опыта решают, с какими отказами необходимо бороться, а какими можно пренебречь. Вот в этих-то решениях в неявном виде и учитывается вероятность отказа.

В исходном американском варианте FMEA вероятность количественно не оценивается даже на глаз. Чрезвычайно поучительна в этом вопросе история катастрофы космического «шаттла» (челнока) «Челленджер» в 1986 году. Взрыв был вызван нарушением герметичности резиновой прокладки между секциями твёрдотопливного ускорителя, за которым и последовало всё то, что было предусмотрено FMEA (смотри вышеприведенный пример). Вот цитата из статьи [6]: «Ошибается тот, кто считает, что NASA пошло на заведомый риск с запуском «Челленджера» и проиграло. Национальное управление использовало метод экспертных оценок надёжности и по существу не знало, чем закончится тот или иной запуск. После трагедии «Челленджера» член президентской комиссии по расследованию, лауреат нобелевской премии Ричард Фейнман публично высмеял расчёты NASA».

Действительно, Р. Фейнман прекрасно описал ситуацию [5]. Разработчики хорошо знали об опасности такого отказа, но ничего не знали (и знать не хотели) о вероятности его возникновения. Вот сцена из [5].

«Я раздал каждому из присутствовавших по листку бумаги, сказав: «Теперь, пожалуйста, пусть каждый из вас напишет, что он думает о вероятности аварии, вызванной двигателем».

Ответов было четыре: три от инженеров и один от администратора, мистера Лавингуда. Один из ответов был явной отпиской, я взглянул на мистера Лавингуда и сказал: «Мне кажется, Вы уклонились от ответа».

Он ответил: «Не думаю».

«Ладно, смотрите, - сказал я, - Вы не ответили мне, какова Ваша цифра. Вы рассказали мне только, как Вы её определяете. А я хочу знать: после того, как Вы её определили, какова она?»

Он говорит: «100-процентная надёжность». Инженеры раскрывают рты от удивления. Я тоже. Смотрю на него, все смотрят на него, и он добавляет: «Ну... минус малая величина».

- Ладно. Теперь остаётся только выяснить, сколь мала эта малая величина?

Он отвечает: «1/100 000». Я показываю мистеру Лавингуду остальные ответы (все примерно 1/200)».

Наверное, если бы при оценке надёжности использовали оценку вероятности хотя бы такую «среднепотолочную», какую провёл Р.Фейнман (её приличнее называть экспертной), катастрофы можно было бы избежать. Было бы какое-то обсуждение, и три инженера вполне могли бы переубедить своего руководителя. А цифра 1/200 уже о многом говорит, уже можно многое «прикинуть»: если двигателей используется два, то для комплекса только они дают 1/100, да ещё другие компоненты, да наземное управление... Отсюда и ряд технических решений. Вот ещё пример из [5].

«Первым событием стало сообщение ответственного за безопасность окружающей местности, офицера по имени Юлиан, который пришёл к нам и рассказал о дискуссии по поводу безопасности, которую он имел с руководством NASA. Мистер Юлиан должен был решить, устанавливать ли на шаттле заряды, чтобы иметь возможность взорвать его в случае его падения на город. Шишки из NASA сказали: «Никаких зарядов не надо, шаттл безопасен. Он никогда не упадёт на город».

Мистер Юлиан пытался доказать, что такая опасность существует. Раньше одна из 25 ракет терпела аварию, и мистер Юлиан оценивал вероятность аварии как 1/100 - этого вполне достаточно, чтобы оправдать установку зарядов. Однако руководители NASA сказали, что вероятность аварии равна 1/100000. Это означает, что если вы будете запускать по одному шаттлу каждый день, среднее время до первой аварии составит 300 лет, - это была явно дикая оценка».

Упомянутый Юлиан мог сильно ошибаться в своей 1/100, но если бы NASA в своё время сопоставило все имевшиеся количественные оценки, то иначе был бы решён и вопрос об установке зарядов,

и многие другие вопросы. Данные-то были: «Ко времени катастрофы все знали об утечках через кольцевые прокладки и эрозию материала, но закрывали на это глаза, вновь и вновь ссылаясь на то, что использование таких же стыковочных соединений в ракете-носителе «Титан» доказало их надежность. Если бы инженеры проводили оценку вероятности прогара по методике PRA (*т.е. с учётом вероятности*), им пришлось бы досконально разобраться со статистикой по испытаниям ракеты «Титан». Согласно данным ВВС по запускам и стендовым испытаниям этой ракеты, прокладки оказываются негерметичными в одном из нескольких дюжин включений» [6]. Но FMEA не предусматривает никакой работы с реальной статистикой.

В России FMEA вновь возник в 1995 году в виде ГОСТа под названием АВПКО (анализ видов, последствий и критичности отказов) и АВПО (то же, но без критичности, т.е. вероятности). Здесь есть разумные оговорки типа «проведение АВПКО не отменяет необходимости выполнения расчётов надёжности в соответствии с общими указаниями ГОСТ 27.301», т.е. АВПКО представлен как полезное дополнение к обычному расчёту. Более того, «критичность» (входящую в АВПКО) предлагается определять с учётом некоторой количественной оценки вероятности отказов, измеряя её в баллах. Так, вероятность от 0,001 до 0,005 - 4 балла, от 0,005 до 0,0025 - 5, и т.д. Это явный шаг назад - ведь с баллами, в отличие от вероятностей, нельзя производить даже элементарных расчётов. Перевод вероятностей в баллы после обычного расчёта надёжности - удивительный приём, видимо, позволяющий кому-то сохранить привычные методы. Но для АВПО и этого не надо, он узаконен в исходном примитивном виде.

Известны зарубежные методы, авторы которых идут дальше - они во-всю перемножают баллы, суммируют их и т.д., получая в итоге якобы обоснованную последовательность отказов, ранжированную по очерёдности их устранения. Однако ранжированность эта чисто внешняя, создающая иллюзию обоснованности, и на самом деле не более обоснованная, чем сразу (без всяких расчётов) написанная опытным инженером.

Надо согласиться с некоторыми авторами в том, что « в силу простоты и наглядности результаты АВПКО выглядят для администрации предприятия более убедительными, чем сложные математические модели расчёта надёжности, тем более основанные на недостоверных исходных данных». Однако, во-первых, нельзя подгонять расчёты под такую администрацию. Во-вторых, конечно, необходимо основывать расчёты на достоверных данных и терпеливо их набирать (хотя гораздо легче объявить статистику «недостоверной» и перейти на баллы, чем «досконально разбираться со статистикой по испытаниям»). Но уж если данных действительно нет - решать задачу просто на-глаз, с помощью интуиции и опыта, не пуская пыль в глаза себе и другим. Кстати, этот простейший и всегда доступный метод часто даёт тот же результат, что и сложные (и даже по-настоящему научные) расчёты.

Конечно, и FMEA (АВПО, АВПКО) приносит некоторую пользу: любые ритуальные танцы вокруг любой проблемы привлекают внимание к ней, требуют каких-то действий, а действия всё-таки хоть чуть-чуть, но улучшают состояние дел.

Драматический пример с шаттлом не является редчайшим примером того, когда из-за пренебрежения опытом вероятностных расчетов гибнут люди. Непредвиденные оттого, что их и не пытались предвидеть, падения и разрушения кранов, тяжёлые отказы систем электротеплоснабжения и др., к сожалению, имеют место. Поэтому объективный вред от внедрения FMEA состоит в том, что он подменяет и расчёты надёжности, и сбор экспериментальных данных о ней.

Можно понять желание инженера различать отказы по важности (по последствиям для человека, для среды, для выполнения задачи и проч.), но методики для объективного учёта последствий отказа с его вероятностью пока не существует. Возникло много разговоров о так наз. рисках, определяемых как «сочетание вероятности с последствиями». Что это за сочетание, пока неизвестно. Некоторую надежду даёт использование коэффициента сохранения эффективности *Кэф*, допускающего учёт «весомости» отказов. Используемые при этом весовые коэффициенты (не баллы!) имеют чёткий физический смысл, их можно и вычислить, и определить экспериментально.

6. ЛИТЕРАТУРА

1. Дзиркал Э.В. Задание и проверка требований к надёжности сложных изделий. - М.: Радио и связь, 1981.
2. ГОСТ 27.002-89 Надёжность в технике. Основные понятия. Термины и определения.
3. ГОСТ 27.003-90 Надёжность в технике. Состав и общие правила задания требований по надёжности.
4. Military Handbook MIL"HDBK"217F. Reliability Prediction of Electronic Equipment, 1991, с изм.1 от 1992 г. и изм.2 от 1995 г.
5. Р.Фейнман. Мистер Фейнман едет в Вашингтон. - «Природа», 1988, №7, стр. 90 - 100. 6. Э. Дж. Лернер. Альтернатива «запуску на-авось». - «Аэрокосмическая техника», 1987, №9, стр.157 - 160.
7. Надёжность технических систем: Справочник. Ю. К. Беляев, В. А. Богатырев, В. В. Болотин и др.; под ред. И. А. Ушакова. — М.: Радио и связь, 1985.— 608 с, ил.
8. Мухелишвили Г.Н., Черкесов Г.Н. Методы и средства управления процессами разделения изотопных смесей в насадочных колоннах. – Тбилиси: Мецниереба, 1979.
9. Дружинин Г.В. Надёжность автоматизированных систем. М., Энергия, 1977.
10. ГОСТ 27.410 – 87(пересмотрен в 2002 г.) Надёжность в технике. Методы контроля показателей надёжности и планы контрольных испытаний на надёжность.
11. Головин И.Н., Чуварыгин Б.В., Шура – Бура А.Э. Расчёт и оптимизация комплектов запасных элементов радиоэлектронных систем. – М.; Радио и связь, 1984.

ГОСТ Р ИСО 9000-2001 Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь.

ПРИЛОЖЕНИЕ А. РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКТОВ ЗИП

А1. ОПРЕДЕЛЕНИЯ. ПОКАЗАТЕЛИ ДОСТАТОЧНОСТИ ЗИП.

Основные термины в области обеспечения изделий запасными частями, используемые ниже, приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1. Термины и определения

Термин	Определение
Комплект ЗИП ЗИП-О ЗИП-Г	Комплект запасных частей (ЗЧ), инструментов и принадлежностей, предназначенный для обеспечения эксплуатации (ремонта и технического обслуживания) изделий. <u>Примечание</u> – с точки зрения методик оценки и расчета запасов различают: один комплект ЗИП (ЗИП-О), который обеспечивает эксплуатацию одного изделия, и групповой комплект ЗИП (ЗИП-Г), который обеспечивает эксплуатацию группы изделий. Все другие разновидности ЗИП (аварийный, стационарный, базовый, бортовой и т.п.) отражают лишь особенности конструкции и (или) назначения комплектов ЗЧ и при расчетах несущественны.
Двухуровневая система ЗИП	Совокупность одного комплекта ЗИП-Г и нескольких комплектов ЗИП-О, обеспечивающих эксплуатацию группы однотипных изделий.
Отказ комплекта ЗИП	Событие, состоящее в том, что поступившая в ЗИП заявка на ЗЧ какого-либо из предусмотренных в нём типов не удовлетворяется из-за того, что запас этого типа оказался «пустым» (израсходован ранее и еще не пополнен в соответствии с принятой стратегией пополнения).
Интенсивность замены составных частей	Среднее число замен составных частей данного типа в обслуживаемом комплекте ЗИП изделия за единицу времени
Интенсивность спроса на запасные части	Среднее число заявок на запасные части данного типа, поступающих в комплект ЗИП от обслуживаемого изделия за единицу времени
Запас	Совокупность запасных частей одного типа (типономинала, типоразмера), характеризующая начальным уровнем, суммарными затратами, стратегией пополнения и показателем достаточности.
Стратегия пополнения запаса	Совокупность правил, на основании которых пополняют (восстанавливают) запас в комплекте ЗИП. <u>Примечание.</u> Правила регламентируют момент выдачи, длительность, источник и порядок реализации требования на пополнение.
Начальный уровень запаса	Количество запасных частей одного типа, закладываемое в комплект первоначально (в дальнейшем оно уменьшается по мере расходования ЗЧ)
Время экстренной доставки запасной части	Среднее значение времени (в единицах наработки) от момента отказа комплекта ЗИП по запасу данного типа до момента внепланового (экстренного) восстановления этого запаса из источника пополнения.
Время доставки запасной части	Среднее значение времени (в единицах наработки) от момента изъятия запасной части из запаса данного типа в комплекте ЗИП до момента восстановления этого запаса из источника пополнения.
Время ремонта составной части	Среднее значение времени (в единицах наработки) от момента изъятия запасной части из запаса данного типа в комплекте ЗИП до момента возвращения в этот запас отремонтированной составной части того же типа.

Показатель достаточности запаса (комплекта ЗИП)	Количественная характеристика, определяющая влияние начального уровня запаса (всех запасов в комплекте ЗИП) на уровень надежности обеспечиваемого изделия в заданных условиях и режимах его эксплуатации и при заданной (принятой) стратегии пополнения запаса (запасов).
Среднее время задержки в удовлетворении заявки на запасную часть одним запасом (комплект ЗИП)	Стационарное значение отношения математического ожидания суммы интервалов времени задержки в удовлетворении заявок на запасную часть, вызванных отказами комплекта ЗИП по запасу данного (любого) типа за некоторый период эксплуатации, к математическому ожиданию общего количества заявок на запасную часть этого (любого) типа, поступивших в комплект ЗИП за тот же период.
Среднее время замены составной части	Среднее значение времени от момента установления факта отказа составной части какого-либо из предусмотренных в комплекте ЗИП типа до момента окончания процесса замены этой составной части на исправную запасную часть того же типа из комплекта ЗИП при условии, что таковая имеется там в наличии.
Коэффициент готовности запаса	Вероятность того, что в произвольный момент времени при принятой стратегии пополнения запаса данного типа, отказ комплекта ЗИП по нему не произойдет.
Коэффициент готовности одиночного комплекта ЗИП	Вероятность того, что в произвольный момент времени, при принятых стратегиях пополнения запасов всех типов, отказ одиночного комплекта ЗИП ни по одному из них не произойдет.
Коэффициент готовности группового комплекта ЗИП (относительно одного из изделий обслуживаемой группы)	Вероятность того, что в произвольный момент времени, при принятых стратегиях пополнения запасов всех типов, отказ группового комплекта ЗИП ни по одному из них относительно одного (любого) изделия в обслуживаемой группе (то есть по заявкам только от него) не произойдет.

Принятые сокращения

ЗЧ - запасная часть

ЗИП-О - одиночный комплект ЗИП

ЗИП-Г - групповой комплект ЗИП

ЗИП-РО - комплект ЗИП ремонтного органа

ЗИП-р - ремонтный комплект ЗИП

НИП - неотказывающий источник пополнения

НРЗЧ - нормы расхода ЗЧ

ПД - показатель достаточности (одного запаса или всех запасов в комплекте ЗИП)

ПН - показатель надежности (изделия)

СЗ - суммарные затраты

С ЗИП - система ЗИП

СЧ - составная часть изделия

ЗЧ – запасная часть (части)

ТО - техническое обслуживание

Общие положения. Включенные в настоящий раздел методики предназначены для оценки и расчета количественных характеристик запасов восстанавливаемых и невосстанавливаемых составных частей (СЧ) в одиночных и групповых комплектах ЗИП (ЗИП-О и ЗИП-Г), придаваемых изделиям, а также в двухуровневых системах ЗИП (С ЗИП), состоящих из одного комплекта ЗИП-Г и нескольких одинаковых комплектов ЗИП-О.

Типовые структуры использования комплектов ЗИП-О и ЗИП-Г, для которых применимы методики раздела, показаны на рисунке А1.

Считается, что пополнение комплектов ЗИП-О в структуре 1 и ЗИП-Г в структурах 2, 3 осуществляется со складов (баз снабжения), которые являются неотказывающими источниками пополнения (НИП), то есть удовлетворяющими все заявки на ЗЧ без задержки.

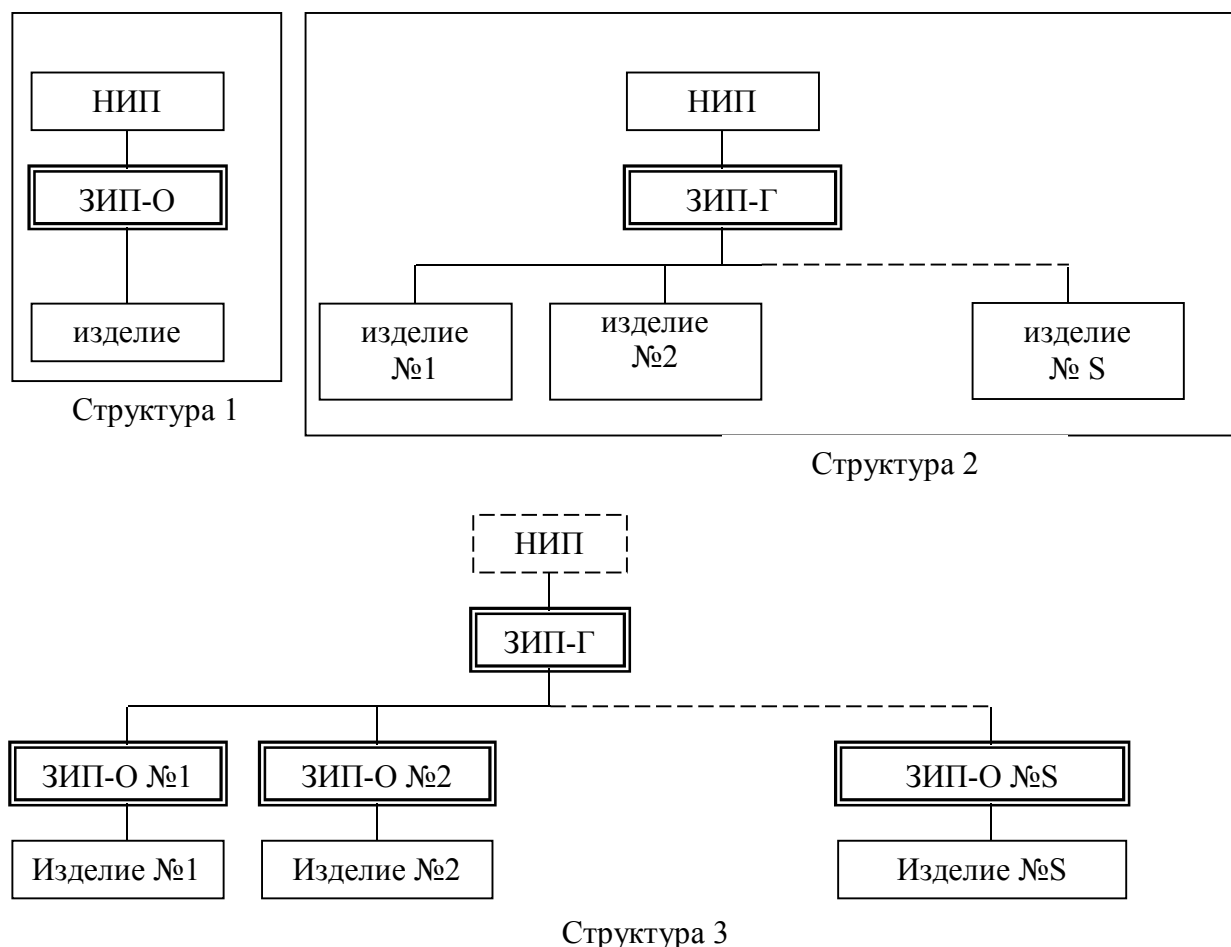


Рис. А1. Типовые структуры использования комплектов ЗИП-О и ЗИП-Г

Основными количественными характеристиками запасов в комплектах ЗИП являются показатели достаточности (ПД) и суммарные затраты (СЗ) на запасные части (ЗЧ).

В качестве показателей достаточности (ПД) запасов в комплекте ЗИП-О используют:

а) среднее время задержки в удовлетворении заявок на ЗЧ комплектом ЗИП-О - $\Delta t_{\text{зип-о}}$.

По определению величина $\Delta t_{\text{зип-о}}$ связана с показателями ремонтпригодности обслуживаемого изделия через среднее время замены СЧ (T_3), которое определяется выражением:

$$T_3 = T_{3\infty} + \Delta t_{\text{зип-о}},$$

где $T_{3\infty}$ - среднее время замены СЧ в обслуживаемом изделии при неограниченных запасах в ЗИП-О.

Как следствие, ПД $\Delta t_{\text{зип-о}}$ может использоваться в качестве поправки к T_B изделия по формуле:

$$T_B = T_{B\infty} + \Delta t_{\text{зип-о}}.$$

Отметим, что соотношение между T_3 , $T_{\text{уст}}$ и T_B следует применять не к изделию в целом, а к каждому из устройств (основных, резервных и вообще всех элементов схемы расчета надежности).

б) коэффициент готовности ЗИП-О – $K_{Г.\text{зип-о}}$.

По известным ПД отдельных запасов (с достаточностью для инженерных расчетов точностью) он определяется как произведение:

$$K_{\Gamma.зип-о} = \prod_{i=1}^{N_o} K_{\Gammaзiо},$$

где $K_{\Gammaзiо}$ - коэффициент готовности запаса i -го типа в ЗИП-О.

Если обслуживаемое комплектом ЗИП-О изделие не содержит резервных устройств (или доля заявок на ЗЧ в ЗИП-О от резервных устройств в общем потоке заявок относительно мала), то $K_{\Gamma.зип-о}$ может быть использован непосредственно в качестве поправки к коэффициенту готовности этого изделия по формуле:

$$K_{\Gamma} = K_{\Gamma\infty} \cdot K_{\Gamma.зип-о}$$

где $K_{\Gamma\infty}$ - значение K_{Γ} , вычисленное при неограниченных запасах в ЗИП-О.

При наличии в изделии резервных устройств (при существенной доле заявок на ЗЧ от них) пользоваться этой формулой нельзя, а учет влияния ограниченности ЗИП-О на надежность изделия следует проводить через $\Delta t_{зип-о}$.

Для ПД $K_{\Gamma.зип-о}$ и $\Delta t_{зип-о}$ одного и того же комплекта ЗИП-О справедливо соотношение:

$$K_{\Gamma.зип-о} \cong \exp\left\{-\Delta t_{зип-о} \cdot \sum_{i=1}^{N_o} \Lambda_{iо}\right\}. \quad (xxx)$$

Для комплектов ЗИП-Г в качестве ПД используют:

а) среднее время задержки в удовлетворении заявок на ЗЧ комплектом ЗИП-Г - $\Delta t_{зип-г}$.

По определению величина $\Delta t_{зип-г}$ выражается отношением:

$$\Delta t_{зип-г} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{\Gamma}} \Lambda_{i\Gamma} \cdot \Delta t_{зi\Gamma}}{\sum_{i=1}^{N_{\Gamma}} \Lambda_{i\Gamma}}, \quad (6.7)$$

- где $\Lambda_{i\Gamma}$ - интенсивность спроса на ЗЧ i -го типа в ЗИП-Г;
 N_{Γ} - общее количество типов ЗЧ в ЗИП-Г (размер номенклатуры ЗИП-Г);
 $\Delta t_{зi\Gamma}$ - среднее время задержки в удовлетворении заявки за ЗЧ запасом i -го типа в ЗИП-Г.

Для комплекта ЗИП-Г, непосредственно обслуживающего группу изделий (структура 2 на рисунке А1), ПД $\Delta t_{зип-г}$ связан с показателями ремонтпригодности обслуживаемых изделий так же, как $\Delta t_{зип-о}$ через среднее время замены СЧ – T_3 (см.п.6.1.1.а)) и может использоваться для количественной оценки влияния ЗИП-Г на надежность этих изделий (при тех же ограничениях) по формулам, аналогичным (6.2), (6.3);

б) коэффициент готовности ЗИП-Г относительно j -го образца из обслуживаемой группы изделий – $K_{\Gamma.зип-гj}$.

Определяется по формуле:

$$K_{\Gamma.зип-гj} = \exp\left\{-\Delta t_{зип-г} \cdot \sum_{i=1}^{N_{\Gamma}} \Lambda_{ij\Gamma}\right\}, \quad (6.8)$$

- где $\Lambda_{ij\Gamma}$ - Интенсивность спроса на ЗЧ i -го типа в ЗИП-Г от одного j -го образца изделия из группы.

Если обслуживаемые комплектом ЗИП-Г однотипные изделия не содержат резервных устройств, то ПД $K_{г.зип-г}$ может быть использован в качестве поправки к $K_{г}$ одного такого изделия по формуле:

$$K_{гj} = K_{гj \infty} \cdot K_{г.зип-гj}. \quad (6.9)$$

В двухуровневой системе ЗИП (С ЗИП) показателями достаточности запасов во всех случаях являются ПД комплектов ЗИП-О, находящихся на первом («нижнем») уровне системы (то есть $\Delta t_{зип-о}$ или $K_{г.зип-о}$). Однако значения этих ПД должны быть рассчитаны с учетом ограниченности запасов в комплекте ЗИП-Г, находящемся на втором уровне системы (то есть с поправкой на $\Delta t_{зип-г}$, порядок внесения которой изложен ниже в разделе 11).

Суммарные затраты на ЗЧ в комплектах ЗИП-О, ЗИП-Г и в системе ЗИП могут измеряться в единицах стоимости, объема, веса и т.д. В пределах одного конкретного расчета затраты на ЗЧ всех типов должны задаваться в одинаковых единицах. При необходимости в расчетах могут учитываться дополнительные затраты на транспортировку (доставку) ЗЧ в комплекты ЗИП из различных источников пополнения. Эти затраты целесообразно определять в расчете на одну доставку одной запчасты и включать в стоимость ЗЧ соответствующего типа. При расчете комплектов ЗИП должны учитываться только затраты на ЗЧ, а не полные затраты на комплекты, в которые входят ещё и затраты на контрольно-измерительные приборы, инструменты, материалы. Запасы последних рассчитывают по другим методикам.

Если данные о затратах на ЗЧ (о стоимости, объеме или массе одной ЗЧ каждого типа) отсутствуют, в исходных данных по всем запасам затраты принимаются равными единице ($C_i = \text{const} = 1$), тогда рассчитанные запасы будут минимизированы по суммарному количеству ЗЧ в комплекте ЗИП.

Стратегии пополнения запасов. Чаще других используются четыре типа стратегий пополнения запасов в комплектах ЗИП:

- периодическое пополнение (условный индекс $\alpha_i = 1$);
- периодическое пополнение с экстренными доставками ($\alpha_i = 2$);
- непрерывное пополнение ($\alpha_i = 3$);
- пополнение по уровню неснижаемого запаса ($\alpha_i = 4$).

Кроме типа (индекса α_i) каждая стратегия пополнения характеризуется одним (T_i) или двумя числовыми параметрами (T_i и β_i), имеющими следующие значения:

при $\alpha_i=1$ – один параметр $T_i=T_{пi}$ – период планового пополнения i -го запаса;

при $\alpha_i=2$ - $T_i=T_{пi}$ – период планового пополнения i -го запаса;

$\beta_i=T_{эди}$ – время экстренной доставки ЗЧ i -го типа;

при $\alpha_i=3$ - $T_i=T_{дi}$ ($T_{рi}$) – время доставки (ремонта) ЗЧ i -го типа;

при $\alpha_i=4$ - $T_i=T_{дi}$ – время доставки ЗЧ i -го типа;

$\beta_i=k_i$ – уровень неснижаемого запаса i -го типа.

Каждый отдельный запас в комплекте ЗИП может пополняться по своей отдельной стратегии, отличающейся от других как типом (α_i), так и значениями числовых параметров (T_i , β_i).

Стратегию периодического пополнения (пополнение только в конце периода) обычно применяют для запасов невосстанавливаемых СЧ с относительной малой интенсивностью спроса на них и небольшими затратами (стоимостью, весом). Эта стратегия является единственно возможной в тех случаях, когда пополнение комплекта ЗИП в интервале времени $(0, T_{пi})$ технически невозможно или связано с неоправданно большими затратами (например, для ЗИП оборудования удаленных и (или) труднодоступных объектов, ЗИП на борту морского судна, находящегося в длительном плавании, и т.п.).

Стратегия периодического пополнения с экстренными доставками предусматривает, что кроме планового пополнения запаса в конце периода $T_{пi}$, в случае отказа ЗИП по этому запасу может быть осуществлено экстренное его пополнение до начального уровня за время $T_{эди}$. Эту стратегию применяют для тех запасов, которые при строго периодическом пополнении оказываются неприемлемо большими по затратам (например, для пополнения комплектов ЗИП крупногабаритными, дорогими и недостаточно надежными СЧ). При этом дополнительные затраты на экстренные доставки должны иметь приемлемые размеры.

Стратегию непрерывного пополнения следует применять для запасов восстанавливаемых СЧ, которые либо обмениваются в органах снабжения или в комплекте ЗИП более высокого уровня, либо восстанавливаются в ремонтном органе и возвращаются в тот же комплект ЗИП. Данную стратегию целесообразно использовать также в двухуровневых системах ЗИП для пополнения запасов в оди-

ночных комплектах из группового комплекта ЗИП системы. Характерным для стратегии непрерывного пополнения является то, что заявка на пополнение формируется по каждой отказавшей СЧ отдельно, а время доставки (ремонта) при этом отсчитывается от момента изъятия из комплекта ЗИП (отказа СЧ в изделии) и может быть существенно меньшим, чем $T_{пн}$ при периодическом пополнении.

Стратегия пополнения по уровню неснижаемого запаса предусматривает, что каждый раз, когда после последнего обращения к запасу данного типа в нем остается k_i запасных частей, он пополняется до начального уровня за время $T_{дi}$. Эту стратегию рекомендуется применять для запасов недостаточно надежных, но дорогих СЧ, в тех случаях когда простои изделия из-за отказа ЗИП недопустимы или нежелательны (например, для запасов мощных генераторных магнетронов, клистронов, ЛБВ в ЗИП РЛС дальнего обнаружения и т.п.). Её обычно используют только для ЗИП-О.

Расчет запаса одного типа – это определение его начального уровня, удовлетворяющего предъявленным требованиям (по ПД или СЗ на ЗЧ) при принятой стратегии пополнения. Расчет запасов **в комплекте** ЗИП складывается из расчетов запасов каждого типа и последующей оценки ПД и СЗ на комплект в целом.

Оптимизация запасов. На всех этапах проектирования расчеты запасов в ЗИП должны обеспечивать оптимизацию затрат на запчасти. Задача оптимизации возникает вследствие того, что простой изделия из-за отсутствия в ЗИП нужной ЗЧ возникает независимо от типа ЗЧ – грошовой прокладка здесь эквивалентна дорогому генератору. Поэтому лучше иметь в комплекте много прокладок и мало (может быть, ноль) генераторов – такой комплект ЗИП будет дешевле. Однако нельзя положить в комплект одни прокладки, это допустимо лишь до определённого предела (когда необходимо добавить и генератор), что и обеспечивается алгоритмом расчёта.

Задача оптимизации запасов в комплекте ЗИП может решаться в двух постановках:

а) расчет запасов, обеспечивающих заданный уровень ПД комплекта ЗИП при минимальных СЗ на комплект - **прямая задача** оптимизации;

б) расчет запасов, удовлетворяющих заданному ограничению по суммарным затратам на комплект при максимально достижимом уровне ПД комплекта - **обратная задача** оптимизации.

При расчете оптимальных запасов исходные данные выбирают исходя из требований, предъявляемых к уровню надежности обеспечиваемого изделия и принятой для него системы технического обслуживания и ремонта. При этом особое внимание должно уделяться правильному соотношению между требованиями к ПД ЗИП и ПН изделия [см. ниже (6.2а), (6.3а) и (6.5а)], а также рациональному выбору предварительной номенклатуры и стратегии пополнения запасов, которые должны соответствовать имеющейся или заданной (принятой) системе текущего ремонта изделия и его восстанавливаемых составных частей (сменных узлов, блоков, ячеек и др.).

Окончательную номенклатуру комплекта ЗИП определяют по результатам оптимизации. Если рассчитанный уровень запаса какого-либо типа оказывается равным нулю, то ЗЧ этого типа в комплект ЗИП не закладывают.

Под оценкой запаса какого-либо одного типа понимают определение значений показателей его достаточности и суммарных затрат на запасные части (при известном начальном уровне запаса и заданной (принятой) стратегии пополнения). Оценка запасов в комплекте ЗИП складывается из оценок запасов каждого типа в отдельности и определения на их основе ПД и СЗ на запчасти по комплекту ЗИП в целом. Это фактически третья постановка задачи о ЗИПе.

Оценку запасов в комплекте ЗИП проводят:

- при проектировании ЗИП – после расчета каждого варианта комплекта с целью определения фактических значений ПД и СЗ на запчасти и исключения возможных ошибок расчета (контрольная оценка);
- при проверке выполнения требований к ЗИП на приемочных испытаниях опытных образцов изделий, при сертификации, при закупке серийных образцов оборудования;
- при решении вопроса о возможности использования (или необходимости перерасчета) спроектированных ранее и (или) закупаемых комплектов ЗИП в условиях эксплуатации, отличающихся от тех, для которых они проектировались (например, при другой

интенсивности эксплуатации оборудования, других стратегиях пополнения запасов и т.п.).

Оценка достаточности и расчеты оптимальных запасов в комплектах ЗИП могут проводиться при использовании любого из двух ПД ($\Delta t_{\text{зип-г}}$ или $K_{г.зип}$) и любой из четырех (для ЗИП-О) или только первых трех (для ЗИП-Г) типов стратегий пополнения запасов.

Составные части изделий, заменяемые по времени (независимо от отказов и вообще от технического состояния), в расчетах ЗИП не учитывают. Запасы таких СЧ рассчитывают делением средней наработки изделия в целом (за период пополнения их в комплекте) на ресурс этих СЧ и считают заведомо достаточными (показатели достаточности этих запасов не определяют), а затраты на них добавляют к суммарным затратам на запасы всех остальных типов после расчета последних. Количество контрольно-измерительных приборов, инструментов, принадлежностей и материалов, входящих в комплекты ЗИП, а также запасы предохранителей, крепежных изделий, монтажных проводов и других составных частей, для которых не установлена (или не может быть определена) интенсивность замен, не оценивают и не рассчитывают. Потребность в этих элементах ЗИП определяют, исходя из опыта эксплуатации аналогов (прототипов).

Методики, предназначенные для ЗИП-Г, могут быть использованы также для оценки и расчета оптимальных запасов в комплектах ЗИП, придаваемых ремонтным органам (ЗИП-РО) для обеспечения ремонта восстанавливаемых сменных СЧ изделий (относительно этих СЧ указанные комплекты ЗИП являются групповыми). Расчеты в этом случае следует проводить при условии, что интенсивность спроса в ЗИП-РО на ЗЧ i -го типа (Λ_{ir}) определяется суммарным потоком отказов узлов (деталей) этого типа в составных частях **всех типов**, где они применяются, **во всех образцах** изделий, обслуживаемых данным ремонтным органом (мастерской).

Аналогичным образом указанные методики могут быть использованы (при соответствующей интерпретации исходных данных) для оценки или расчета запасов в ремонтных комплектах ЗИП (ЗИП-Р), предназначенных для обеспечения плановых (капитальных, средних и т.п.) ремонтов определенного количества изделий одного типа. Однако чаще ремонтные органы, проводящие плановые ремонты изделий, обеспечиваются запасными частями и ремонтными материалами не с помощью комплектов ЗИП-Р, а путем создания переходящих их запасов по средним нормам расхода ЗЧ (см. ниже раздел 12).

A2. Исходные данные для расчета запасов в комплектах ЗИП

A2.1. Для оценки и расчета запасов в ЗИП-О или ЗИП-Г необходимы следующие исходные данные:

- а) вид показателя достаточности, а при решении прямой задачи оптимизации и требуемое (заданное) его значение;
- б) вид затрат на ЗЧ, а при решении обратной задачи оптимизации и требуемое значение ограниченной по затратам ($C_{\Sigma\text{зип-о}}^{\text{огр}}$ или $C_{\Sigma\text{зип-г}}^{\text{огр}}$);
- в) общее количество типов ЗЧ в ЗИП, т.е. размер номенклатуры комплекта (N_o или N_r);
- г) параметры запасов каждого типа:
 - порядковый номер запаса в ЗИП (здесь же могут быть указаны шифр или наименование СЧ);
 - количество СЧ данного типа в изделии, обслуживаемом комплектом ЗИП-О (или в группе из S изделий, обслуживаемых ЗИП-Г);
 - интенсивность замен СЧ данного типа;
 - затраты на одну ЗЧ данного типа (цена, объем, масса и т.п.);
 - тип и параметры заданной стратегии пополнения запаса данного типа в ЗИП;
 - исходный уровень запаса данного типа в ЗИП;
- д) количество обслуживаемых комплектом ЗИП-Г образцов однотипных изделий в структуре 2 или комплектов ЗИП-О в структуре 3 (S). В расчетах по ЗИП-О параметр « S » не используется.

A2.2. Случай неоднотипных изделий, как редко встречающийся в практике, здесь не рассматривается.

А3. МЕТОДИКА РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

А3.1. Общие положения

Для оптимальных решений в методиках расчёта используется метод наискорейшего покоординатного спуска, реализуемый в виде алгоритма «пошаговой» оптимизации, при которой на каждом следующем «шаге» расчета добавляется только одна запасная часть и только в тот запас, увеличение которого на этом «шаге» дает наибольший прирост показателя достаточности на единицу затрат.

Для сокращения трудоемкости и обеспечения безошибочности расчетов рекомендуется использовать ПЭВМ. В случае отсутствия у пользователя ПЭВМ и (или) небольшой номенклатуре ЗИП, расчеты могут быть выполнены и «вручную». При этом порядок (алгоритм) расчетов в обоих случаях (на ПЭВМ и «вручную») одинаков. В России известны две программы для ПЭВМ – «МОДИРОКЗЭРСИЗ» (разработана и продается Минобороны РФ) и «АСОНИКА» (МИЭМ). Для облегчения «ручных» вычислений целесообразно пользоваться вычислительными таблицами, приведенными в монографии [11], там же даны правила и примеры использования таблиц.

Все используемые математические модели оценки ПД и расчета оптимальных запасов описаны в [11]. В моделях приняты следующие допущения и ограничения:

а) поток заявок на ЗЧ в комплекты ЗИП является простейшим (т.е. случайное время между заявками распределено по экспоненциальному закону). Это допущение обеспечивает наиболее «осторожные» оценки значений ПД и начальных уровней запасов;

б) достаточная точность результатов расчетов обеспечивается при условии, что исходные данные по требованиям к достаточности комплектов ЗИП удовлетворяют неравенствам:

$$K_{г.зип}^{тр} \geq 0,9; \quad (A1)$$

$$\text{или} \quad \Delta t_{зип}^{тр} \cdot \sum_{i=1}^N \Lambda_{zi} \leq 0,1. \quad (A2)$$

А3.2. Расчет комплектов ЗИП-О

При решении прямой задачи оптимизации задают требуемое значение

ПД ($\Delta t_{зип-о}$ или $K_{г.зип-о}$) и вид затрат, по которому требуется оптимизировать запасы (т.е. минимизировать затраты).

При решении обратной задачи задают величину ограничений по затратам и вид ПД ($\Delta t_{зип-о}$, $K_{г.зип-о}$), который требуется максимизировать в пределах заданных ограничений.

Прямую задачу оптимизации (минимизация затрат) решают в следующем порядке.

Для каждого i -го запаса принимают некоторый исходный уровень, например, 0 (есть и другие варианты – см. ниже).

Для каждого запаса исходное значение увеличивают на единицу, затем определяют отношение

$$\Delta_i = \Delta R / C_i,$$

где ΔR – приращение показателя достаточности комплекта;

C_i – затраты на i -ю ЗЧ.

Проверяют выполнение требования к ПД. Если требование выполняется, рассчитанный комплект ЗИП-О является оптимальным. Если требование не выполняется, процесс оптимизации продолжают и ведут шагами. На каждом шаге добавляют только одну ЗЧ и только одного типа, а именно выбирают запас с максимальным Δ_i , а затем проверяют, не выполнено ли заданное требование по ПД.

Искомый комплект ЗИП-О определяются как совокупность запасов, которые будут определены на последнем шаге алгоритма (когда впервые будет выполнено требование к ПД).

В заключение вычисляют суммарные затраты на ЗЧ рассчитанного комплекта ЗИП-О.

Обратную задачу оптимизации (максимизация ПД) решают аналогично, но на каждом шаге проверяют ограничение по затратам. Оптимизацию прекращают на том шаге, на котором ограничение выполняется в последний раз. Совокупность запасов, соответствующая этому шагу, и будет искомым оптимальным ЗИП-О.

Выбор исходных значений. Если в ТЗ на разработку изделия (или комплекта ЗИП) было оговорено, что комплект должен обязательно содержать ЗЧ всех типов (или определенные типы ЗЧ), то исходные значения для всех ЗЧ (или только для указанных) принимают равными единице. При этом перед началом расчета необходимо проверить, что затраты на исходный комплект ЗИП-О не превышают ограничения по затратам. Если это условие не выполняется, должны быть пересмотрены требования по обязательной номенклатуре ЗЧ или по ограничениям.

Для сокращения работы можно начинать процесс с такого исходного уровня, когда каждый запас один (без учёта других) обеспечивает требования по ПД комплекта.

А3.2. Расчет комплектов ЗИП-Г

Расчет проводят аналогично расчёту ЗИП-О, но с учётом особенностей объекта обслуживания комплектом ЗИП-Г группы однотипных изделий по сравнению с объектом для ЗИП-О (одним изделием). При этом исходные данные для расчёта включают в себя суммарную интенсивность спроса на ЗЧ со всей группы изделий, для которой проектируется комплект ЗИП-Г. Если расчёт проводится на ЭВМ, то достаточно ввести в программу признак ЗИП-Г и количество изделий в группе S.

А3.3. Оценка запасов в комплектах ЗИП

А3.3.1. Оценка запасов в комплектах ЗИП-О

Для оценки вводят в ЭВМ количество СЧ каждого типа в комплекте ЗИП-О и все данные, необходимые для расчёта ЗИП согласно п. А2.1. ЭВМ вычисляет показатели достаточности комплекта и суммарные затраты на него.

При отсутствии ЭВМ ПД и затраты вычисляют по формулам [11].

А3.3.2. Оценка запасов в комплекте ЗИП-Г

Оценку проводят аналогично ЗИП-О, но интенсивность спроса и затраты суммируют по всем обслуживаемым изделиям.

А3.4. Двухуровневая система ЗИП

Оценку ПД и расчет оптимальных запасов в двухуровневой системе ЗИП проводят при следующих ограничениях:

- а) все комплекты ЗИП-О в системе одинаковы по составу ЗЧ;
- б) все запасы в ЗИП-О пополняются только из ЗИП-Г и только по стратегии непрерывного пополнения ($\alpha_{io}=3$ для всех ЗЧ), то есть, отказавшие сменные СЧ i -го типа обмениваются в ЗИП-Г на исправные в среднем за время T_{dio} (хотя для разных групп или отдельных запасов величина этого параметра может быть различной). Методики для других случаев пока неизвестны.

Исходные данные для расчётов двухуровневой системы ЗИП формируют как совокупность исходных данных по входящим в её состав комплектам ЗИП-О и ЗИП-Г. При этом данные по СПЗ в ЗИП-Г задают из условия, что все запасы пополняются из НИП.

Учет ограниченности комплекта ЗИП-Г, находящегося на втором уровне системы, при оценке показателей достаточности двухуровневой С ЗИП в целом (которыми являются $\Delta t_{зип-о}$ или $K_{г.зип-о}$) во всех случаях осуществляют путем корректировки параметров стратегий пополнения запасов в ЗИП-О (первоначально выбранных в предположении, что запасы в ЗИП-Г не ограничены) на величину $\Delta t_{зип-г}$.

Суммарные начальные затраты на ЗЧ в С ЗИП определяют во всех случаях как сумму затрат на один комплект ЗИП-Г и S комплектов ЗИП-О.

Оценка ПД и расчет оптимальных начальных запасов в С ЗИП требуют, как правило, большого числа итераций и поэтому наиболее успешно могут быть реализованы на ЭВМ. Расчёт без ЭВМ возможен по формулам из [11].

А4. ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЗИП ПО НОРМАМ РАСХОДА

Если на предприятии или в организации (войсковой части), или в определенном регионе эксплуатируется достаточно большой парк однотипных изделий, текущий ремонт и техническое обслуживание которых осуществляется централизованно региональным ремонтным органом (центром сервисного обслуживания), то обеспечение запасными частями может осуществляться не путем придания изделиям или реморганам комплектов ЗИП, а за счет периодического снабжения соответствующих ремонтных органов по нормам расхода запчастей на эксплуатацию (НРЗЧ). Аналогично в экономически обоснованных случаях и ремонтные органы, производящие плановые (средний, капитальный) ремонты изделий, могут обеспечиваться не комплектами ЗИП-Р, а по нормам расхода запасных частей на ремонт определенного вида (НРЗЧ).

Нормы расхода ЗЧ на эксплуатацию или плановый ремонт, как нормативные величины, представляют собой средние значения ожидаемого количества замен СЧ i -го типа в одном изделии (или в группе изделий) за установленный период эксплуатации или при проведении одного (или нескольких) плановых ремонтов.

Для одного изделия значения НРЗЧ на период T_i по СЧ i -го типа определяют по формуле

$$A_{zi}^{(1)} = m_i \cdot \lambda_{zi} \cdot T_i;$$

а для группы из S однотипных изделий эта величина, естественно, домножается на S .

Во всех случаях рассчитанные значения A_{zi} округляют до целого в большую сторону и принимают в качестве НРЗЧ $_i$.

В расчетах по формулам (12.1) и (12.2) величину периода T_i выбирают равной (или кратной) одному году эксплуатации и выражают в единицах наработки изделий (в часах, циклах работы, км. пробега и т.д.) с учетом средней (планируемой) интенсивности эксплуатации.

Значения НРЗЧ для ремонта ($A_{pi}^{(1)}$ и $A_{pi}^{(S)}$) для каждого вида ЗЧ в расчете на один или несколько (S) плановых ремонтов определяют на основе предшествовавших ремонтов изделий-аналогов.

В соответствии со смыслом средних значений НРЗЧ создаваемые на их основе запасы обеспечивают своевременный (без задержки из-за отсутствия нужной ЗЧ) ремонт и (или) обслуживание изделий с вероятностью не более 0,5, то есть достаточность таких запасов существенно ниже, чем у комплектов ЗИП. Однако и затраты (стоимость, масса, объем) на запасы, сформированные по НРЗЧ, как правило, значительно ниже затрат на комплекты ЗИП.

Поэтому обеспечение по НРЗЧ рекомендуется использовать для изделий, эксплуатирующихся большими группами (парками) при условии, что простой некоторой части из них не ведет к серьезным последствиям, а также для ремонтных органов, осуществляющих регулярные плановые ремонты большого числа однотипных изделий.

НРЗЧ могут быть использованы также для формирования планов производства запасных частей и составления заявок на них эксплуатирующими и ремонтными организациями.

При снабжении по НРЗЧ пополнение запасов до нормативного уровня на очередной период проводят с учетом фактического расхода ЗЧ в предшествующий, то есть только по тем позициям, где запас исчерпан полностью или частично.

Нормы расхода ЗЧ устанавливают в эксплуатационных или ремонтных документах, имеющих то же название («Нормы расхода запасных частей») и разрабатываемых в порядке и по правилам, установленным ГОСТ 2.602.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б. ТАБЛИЦЫ

Б1. ДОВЕРИТЕЛЬНЫЕ ГРАНИЦЫ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ТИПА Т

Доверительные границы для T определяются через доверительные границы для λ (т.е. λ_ϵ и λ_n).

Используется табулированная функция $\chi^2(n, \epsilon)$ (см. таблицу).

Для планов NUN, NUr, NRr : $\lambda_\epsilon = \chi^2_{1-\epsilon, 2n}/2T_s$; для NUT, NRT : $\lambda_\epsilon = \chi^2_{1-\epsilon, 2n+2}/2T_s$;

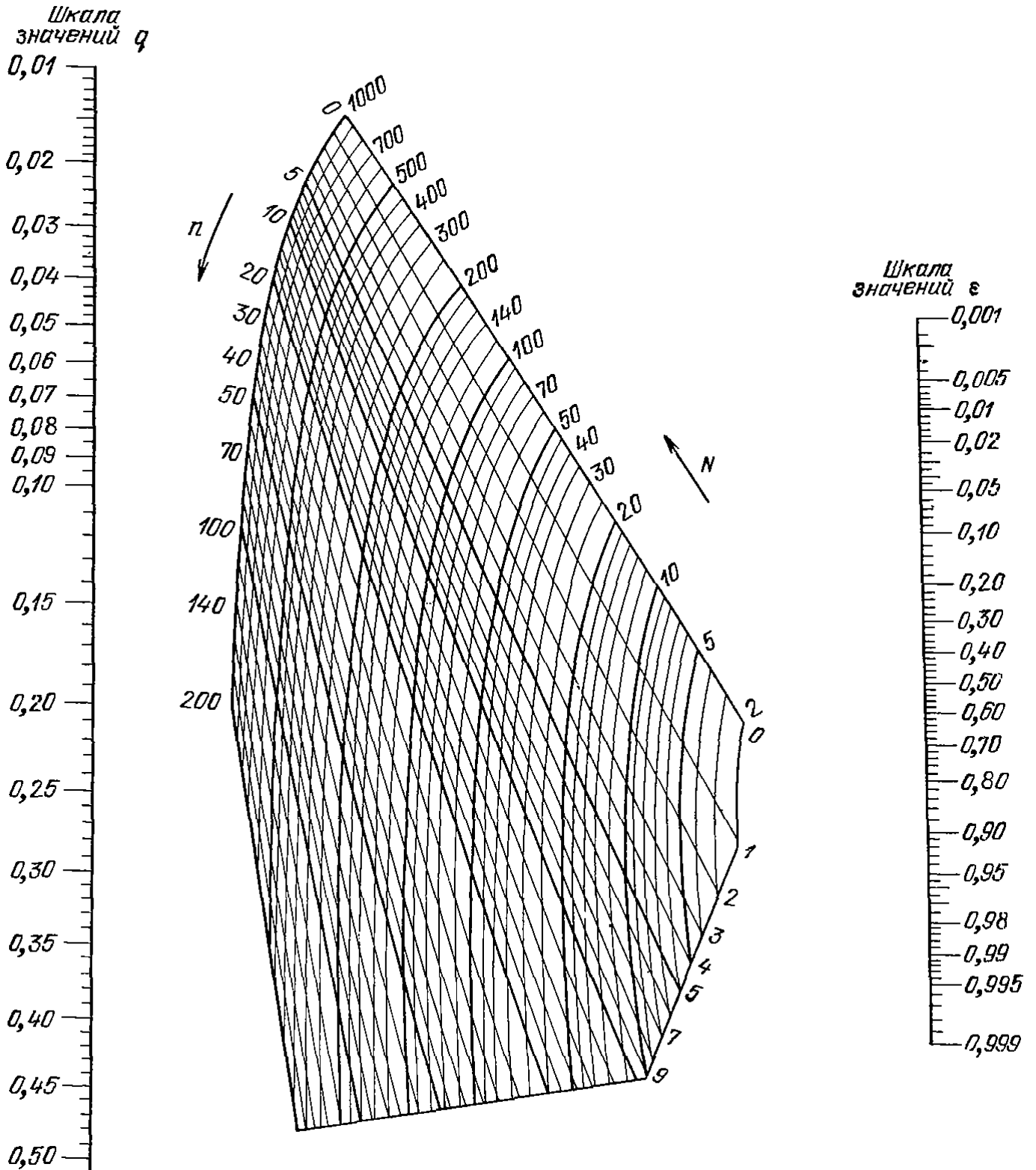
Для всех планов: $\lambda_n = \chi^2_{\epsilon, 2n}/2T_s$; $\epsilon = (1-\gamma)/2$, T_s – суммарная наработка, n – число отказов.

Таблица функции «хи-квадрат»

<i>n</i>	Значения функции «хи-квадрат» при ϵ:													
	0,01	0,02	0,025	0,03	0,05	0,10	0,20	0,80	0,90	0,95	0,97	0,975	0,98	0,99
1	0	0	0	0	0	0,02	0,06	1,64	2,71	3,84	5,02	5,02	5,40	6,63
2	0,02	0,04	0,05	0,05	0,10	0,21	0,45	3,22	4,61	5,99	7,38	7,38	7,80	9,21
3	0,11	0,19	0,21	0,22	0,35	0,58	1,01	4,64	6,25	7,81	9,35	9,35	9,80	11,34
4	0,30	0,43	0,48	0,48	0,71	1,06	1,65	5,99	7,78	9,49	11,14	11,14	11,70	13,28
5	0,55	0,75	0,83	0,83	1,15	1,61	2,34	7,29	9,24	11,07	12,83	12,83	13,40	15,09
6	0,87	1,13	1,23	1,24	1,64	2,20	3,07	8,56	10,64	12,59	14,45	14,45	15,00	16,81
7	1,24	1,56	1,68	1,69	2,17	2,83	3,82	9,80	12,02	14,07	16,01	16,01	16,60	18,48
8	1,65	2,03	2,17	2,18	2,73	3,49	4,59	11,03	13,36	15,51	17,53	17,53	18,20	20,09
9	2,09	2,53	2,70	2,70	3,33	4,17	5,38	12,24	14,68	16,92	19,02	19,02	19,70	21,67
10	2,56	3,06	3,24	3,25	3,94	4,87	6,18	13,44	15,99	18,31	20,48	20,48	21,20	23,21
11	3,05	3,61	3,81	3,82	4,57	5,58	6,99	14,63	17,28	19,68	21,92	21,92	22,60	24,73
12	3,57	4,18	4,40	4,40	5,23	6,30	7,81	15,81	18,55	21,03	23,34	23,34	24,10	26,22
13	4,11	4,76	5,00	5,01	5,89	7,04	8,63	16,98	19,81	22,36	24,74	24,74	25,50	27,69
14	4,66	5,37	5,62	5,63	6,57	7,79	9,47	18,15	21,06	23,68	26,12	26,12	26,90	29,14
15	5,23	5,98	6,26	6,26	7,26	8,55	10,31	19,31	22,31	25,00	27,49	27,49	28,30	30,58
16	5,81	6,61	6,90	6,91	7,96	9,31	11,15	20,47	23,54	26,30	28,85	28,85	29,60	32,00
17	6,41	7,26	7,56	7,56	8,67	10,09	12,00	21,61	24,77	27,59	30,19	30,19	31,00	33,41
18	7,01	7,91	8,23	8,23	9,39	10,86	12,86	22,76	25,99	28,87	31,53	31,53	32,30	34,81
19	7,63	8,57	8,90	8,91	10,12	11,65	13,72	23,90	27,20	30,14	32,85	32,85	33,70	36,19
20	8,26	9,24	9,59	9,59	10,85	12,44	14,58	25,04	28,41	31,41	34,17	34,17	35,00	37,57
21	8,90	9,92	10,29	10,28	11,59	13,24	15,44	26,17	29,62	32,67	35,48	35,48	36,30	38,93
22	9,54	10,6	10,98	10,98	12,34	14,04	16,31	27,30	30,81	33,92	36,78	36,78	37,70	40,29
23	10,20	11,29	11,68	11,69	13,09	14,85	17,19	28,43	32,01	35,17	38,08	38,08	39,00	41,64
24	10,86	11,99	12,40	12,40	13,85	15,66	18,06	29,55	33,20	36,42	39,36	39,36	40,30	42,98
25	11,52	12,70	13,11	13,12	14,61	16,47	18,94	30,68	34,38	37,65	40,65	40,65	41,70	44,31
26	12,20	13,41	13,84	13,84	15,38	17,29	19,82	31,79	35,56	38,89	41,92	41,92	42,90	45,64
27	12,88	14,12	14,57	14,57	16,15	18,11	20,70	32,91	36,74	40,11	43,19	43,19	44,10	46,96
28	13,56	14,85	15,30	15,31	16,93	18,94	21,59	34,03	37,92	41,34	44,46	44,46	45,40	48,28
29	14,26	15,57	16,04	16,05	17,71	19,77	22,48	35,14	39,09	42,56	45,72	45,72	46,70	49,59
30	14,95	16,31	16,79	16,79	18,49	20,60	23,36	36,25	40,26	43,77	46,98	46,98	48,00	50,89

Б2. ДОВЕРИТЕЛЬНЫЕ ГРАНИЦЫ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ТИПА Р

Доверительные границы для P определяются через границы для вероятности отказа ($q = 1 - P(t)$). Используется номограмма из [7]. При этом $q_n = q_n(N, n-1, 1 - \varepsilon) = 1 - P_\varepsilon$, а $q_\varepsilon = q_\varepsilon(N, n, \varepsilon) = 1 - P_n$. Шкалы номограммы имеют следующий смысл: левая шкала – шкала вероятностей q , по ней считываются искомые значения доверительных границ q_n и q_ε ; правая шкала – шкала уровней значимости, на ней отмечаются значения ε и $1 - \varepsilon$; на сетке номограммы дугообразные линии соответствуют числу циклов испытаний N , а прямые наклонные линии – полученному на испытаниях числу отказов n .



Б3. ПЛАНЫ ОДНОСТУПЕНЧАТОГО КОНТРОЛЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ТИПА Т

План контроля при экспоненциальном распределении наработки между отказами определяется отношением приёмочного и браковочного уровней T_0/T_1 и рисками α и β . План представляет собой два числа: браковочное число отказов $r_{бр}$ и предельную суммарную наработку t_{max} .

Величины t_{max} приводятся в единицах T_0 (в таблице указаны отношения t_{max}/T_0). Отношение T_0/T_1 и величина t_{max}/T_0 вычислены для каждой пары значений рисков и для 18 значений $r_{бр}$ по формулам из [7]. Оперативная характеристика любого из приведенных в таблице планов также может быть построена согласно [7].

Общую продолжительность контроля можно по желанию изменять в широких пределах за счет пропорционального изменения числа контролируемых образцов с единственным условием: обеспечить требуемую суммарную наработку t_{max} .

$r_{бр}$	T_0/T_1	T_{max}/T_0	T_0/T_1	T_{max}/T_0	T_0/T_1	T_{max}/T_0	T_0/T_1	T_{max}/T_0
	$\alpha = \beta = 0,05$		$\alpha = \beta = 0,1$		$\alpha = \beta = 0,2$		$\alpha = \beta = 0,3$	
1	58,82	0,05	21,74	0,10	7,246	0,2	3,378	0,36
2	13,33	0,3	7,299	0,53	3,636	0,8	2,222	1,1
3	7,692	0,9	4,831	1,1	2,785	1,6	1,890	1,9
4	5,682	1,4	3,831	1,7	2,404	2,3	1,724	2,8
5	4,651	2,0	3,289	2,4	2,174	3,1	1,621	3,6
6	4,032	2,6	2,941	3,1	2,402	3,9	1,550	4,5
7	3,646	3,3	2,703	3,9	1,919	4,7	1,499	5,4
8	3,350	4,0	2,525	4,7	1,835	5,6	1,460	6,3
9	3,077	4,7	2,392	5,4	1,770	6,4	1,426	7,2
10	2,898	5,4	2,283	6,2	1,718	7,3	1,400	8,1
11	2,747	6,2	2,193	7,0	1,675	8,2	1,377	9,0
12	2,631	6,4	2,118	7,8	1,636	9,0	1,358	10,0
13	2,531	7,7	2,057	8,6	1,605	9,9	1,342	10,9
14	2,445	8,5	2,004	9,5	1,577	10,8	1,328	11,8
15	2,369	9,2	1,953	10,3	1,553	11,7	1,314	12,7
16	2,096	13,2	1,792	14,5	1,460	16,2	1,261	17,4
17	1,942	17,3	1,672	18,8	1,398	20,7	1,230	22,2
18	1,835	21,5	1,602	23,2	1,362	25,3	1,215	26,9

Б4. ПЛАНЫ ОДНОСТУПЕНЧАТОГО КОНТРОЛЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ТИПА P

Число опытов N при одноступенчатом контроле

P_0	$\alpha = \beta = 0,1$				$\alpha = \beta = 0,2$			
	$\frac{1-P_1}{1-P_0} = 2,0$	2,5	3,0	4,0	2,0	2,5	3,0	4,0
	$r_{бр} = 14$	8	6	4	6	4	3	2
0,999	9470	4655	3150	1745	3905	2295	1535	825
0,998	3735	2328	1575	872	1953	1148	768	413
0,997	3158	1552	1050	582	1302	765	512	275
0,996	1369	1164	788	436	977	574	384	207
0,995	1895	931	630	349	781	459	307	165
0,994	1578	776	525	291	651	382	256	138
0,993	1353	665	450	249	558	328	220	118
0,992	1884	582	394	218	489	287	192	103
0,991	1052	518	350	194	434	255	171	92
0,990	947	466	315	175	391	230	154	83
9,960	473	233	158	87	196	115	77	42
0,970	315	155	105	58	131	77	52	28
0,960	237	116	79	44	98	58	39	21
0,950	189	93	63	35	78	46	31	17
0,940	158	78	53	29	66	38	26	14
0,930	135	67	45	25	56	33	22	12
0,920	118	58	40	22	49	29	20	11
0,910	106	52	35	20	44	26	17	10
0,900	95	47	32	18	37	23	16	9

Значения N и $r_{бр}$, приведенные в таблице, определены решением системы уравнений:

$$\sum_{i=0}^{r_{бр}-1} C_N^i P_0^{N-i} (1-P_0)^i = 1-\alpha;$$

$$\sum_{i=0}^{r_{бр}-1} C_N^i P_1^{N-i} (1-P_1)^i = \beta.$$

Б5. ПЛАНЫ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО КОНТРОЛЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ТИПА Т

Характеристики планов испытаний для показателей типа наработки при последовательном контроле (экспоненциальное распределение)

Исходные данные T_0/T_1	План контроля			\bar{t}/T_0	Исходные данные T_0/T_1	План контроля			\bar{t}/T_0
	a	r_0	t_0/T_0			a	r_0	t_0/T_0	
1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
$\alpha = \beta = 0,05$									
58,8	14,2	0,72	0,049	0,049	3,50	2,00	1,11	0,555	0,667
13,3	4,76	1,14	0,239	0,272	3,00	1,82	1,26	0,693	0,923
7,69	3,28	1,44	0,440	0,570	2,79	1,74	1,35	0,777	1,09
5,68	2,69	1,70	0,629	0,90	2,50	1,64	1,51	0,924	1,42
5,00	2,49	1,83	0,736	1,11	2,40	1,60	1,58	0,987	1,58
4,65	2,38	1,92	0,806	1,25	2,17	1,51	1,79	1,18	2,09
4,03	2,17	2,11	0,971	1,62	2,02	1,45	1,97	1,35	2,61
4,00	2,16	2,12	0,981	1,64	2,00	1,44	2,00	1,39	2,71
3,64	2,04	2,28	1,12	1,97	1,92	1,43	2,13	1,51	3,11
3,50	2,00	2,35	1,18	2,12	1,84	1,38	2,28	1,66	3,65
3,30	1,93	2,47	1,28	2,40	1,77	1,35	2,43	1,80	4,18
3,08	1,85	2,62	1,42	2,78	1,72	1,33	2,56	1,93	4,70
3,00	1,82	2,68	1,47	2,94	1,68	1,31	2,69	2,05	5,23
2,90	1,78	2,77	1,55	3,18	1,64	1,29	2,81	2,18	5,79
2,75	1,73	2,91	1,69	3,60	1,61	1,28	2,93	2,29	6,31
2,63	1,69	3,04	1,81	3,99	1,58	1,27	3,04	2,40	6,85
2,53	1,65	3,17	1,92	4,40	1,55	1,26	3,15	2,51	7,86
2,50	1,64	3,21	1,96	4,54	1,50	1,23	3,42	2,77	8,80
2,45	1,62	3,29	2,04	4,81	1,46	1,22	3,66	3,47	10,2
2,37	1,59	3,41	2,15	5,23	1,40	1,19	4,13	3,48	13,2
2,10	1,48	3,98	2,69	7,44	1,36	1,17	4,48	3,83	15,7
2,00	1,44	4,25	2,94	8,64					
1,94	1,42	4,44	3,13	9,52					
1,84	1,38	4,85	3,53	11,6					
1,50	1,23	7,26	5,89	28,0					
$\alpha = \beta = 0,1$									
21,7	6,74	0,713	0,106	0,0995					
7,30	3,17	1,11	0,349	0,408					
5,00	2,49	1,37	0,549	0,735	5,00	2,49	0,526	0,212	0,142
4,83	2,43	1,40	0,574	0,780	4,00	2,16	0,611	0,282	0,210
4,00	2,16	1,59	0,732	1,09	3,50	2,00	0,676	0,339	0,272
3,83	2,11	1,64	0,776	1,18	3,38	1,95	0,696	0,356	0,292
3,50	2,00	1,75	0,879	1,41	3,00	1,82	0,771	0,424	0,376
3,29	1,92	1,85	0,960	1,60	2,50	1,64	0,925	0,565	0,581
3,00	1,82	2,00	1,10	1,95	2,22	1,53	1,06	0,693	0,800
2,94	1,80	2,04	1,13	2,04	2,00	1,44	1,22	0,847	1,10
2,70	1,71	2,21	1,29	2,48	1,89	1,40	1,33	0,952	1,34
2,53	1,65	2,38	1,44	2,94	1,72	1,33	1,56	1,170	1,89
2,50	1,64	2,40	1,46	3,01	1,62	1,29	1,75	1,364	2,46
2,39	1,60	2,52	1,58	3,38	1,55	1,26	1,93	1,54	3,03
2,28	1,55	2,66	1,71	3,84	1,50	1,23	2,09	1,69	3,58
2,19	1,52	2,81	1,84	4,31	1,46	1,22	2,24	1,84	4,16
2,12	1,49	2,93	1,97	4,78	1,43	1,20	2,39	1,99	4,76
2,06	1,47	3,05	2,08	5,24	1,40	1,19	2,52	2,12	5,33
2,00	1,44	3,16	2,19	5,69	1,38	1,18	2,65	2,25	5,94
1,95	1,42	3,28	2,31	6,20	1,36	1,17	2,76	2,37	6,52
1,79	1,36	3,77	2,77	8,42	1,34	1,16	2,88	2,48	7,08
1,67	1,31	4,27	3,27	11,1	1,33	1,16	2,99	2,58	7,65
1,60	1,28	4,66	3,65	13,4	1,31	1,15	3,10	2,70	8,28
1,50	1,23	5,42	4,39	18,6	1,26	1,13	3,65	3,25	11,6
					1,23	1,11	4,09	3,68	14,7
					1,22	1,10	4,35	3,94	16,7
$\alpha = \beta = 0,2$									
7,25	3,15	0,70	0,222	0,195					
5,00	2,49	0,712	0,347	0,348					
4,00	2,16	1,00	0,462	0,515					
3,64	2,04	1,07	0,526	0,618					

Б6. ПЛАНЫ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО КОНТРОЛЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ТИПА Р

Планы контроля показателей надежности типа вероятность безотказной работы по последовательному методу ($\alpha = \beta = 0,05$)

$P_b(t)$	$P_z(t)$	a	r_0	$r_{\text{к}}$	n_0	n'
0,998	0,999	0,00144	4,24	23	2940	8620
0,997	0,999	0,00182	2,68	10	1470	2930
0,996	0,999	0,00216	2,12	6	980	1640
	0,998	0,00289	4,24	23	1470	4300
0,995	0,999	0,00249	1,82	5	730	1110
0,994	0,998	0,00364	2,67	9	733	1460
	0,997	0,00433	4,23	23	977	2870
0,992	0,998	0,00432	2,12	6	488	816
	0,996	0,00577	4,22	23	732	2140
0,991	0,997	0,00546	2,66	9	488	973
0,990	0,998	0,00495	1,82	5	366	550
	0,995	0,00722	4,22	23	584	1710
0,988	0,997	0,00647	2,11	8	325	543
	0,996	0,00729	2,66	12	370	728
	0,994	0,00866	4,21	23	990	1430
0,985	0,997	0,00746	1,82	6	243	366
	0,995	0,00906	2,66	9	290	581
0,986	0,993	0,0101	4,21	23	420	1220
0,984	0,996	0,00865	2,10	8	240	406
	0,992	0,0115	4,20	23	370	1060
0,982	0,994	0,0109	2,65	9	240	483
	0,991	0,0129	4,19	23	320	945
0,980	0,996	0,00996	1,81	5	180	273
	0,995	0,0108	2,10	6	190	324
	0,990	0,0144	4,19	23	290	850
0,976	0,994	0,01308	2,10	6	160	269
	0,992	0,0146	2,64	10	180	361
0,975	0,995	0,0124	1,81	5	150	218
0,973	0,991	0,0164	2,64	9	160	820
0,972	0,993	0,0152	2,09	6	140	230
0,970	0,994	0,0150	1,80	5	120	181
	0,990	0,0182	2,63	9	140	287

Планы контроля показателей надежности типа вероятность безотказной работы по последовательному методу ($\alpha = \beta = 0,1$)

$P_p(t)$	$P_a(t)$	a	r_0	r_{yc}	n_0	n'
0,998	0,999	0,00144	3,16	14	2190	5730
0,997	0,999	0,00182	2,00	6	1100	1950
0,996	0,999	0,00216	1,58	4	730	1090
	0,998	0,00289	3,16	14	1110	2860
0,995	0,999	0,00249	1,36	3	550	734
0,994	0,998	0,00364	2,00	6	550	972
	0,997	0,00433	3,16	14	730	1900
0,992	0,998	0,00432	1,58	4	360	542
	0,996	0,00577	3,15	14	546	1420
0,990	0,998	0,00495	1,36	3	273	366
	0,995	0,00722	3,15	14	440	1140
0,991	0,997	0,00545	1,99	6	364	646
0,988	0,997	0,00647	1,57	5	242	360
	0,994	0,00866	3,14	14	363	947
	0,996	0,00729	1,98	8	270	484
0,985	0,997	0,00746	1,36	3	180	243
	0,995	0,00906	1,98	8	220	386
0,984	0,996	0,00865	1,57	5	180	270
	0,992	0,0115	3,13	14	270	708
0,980	0,996	0,00996	1,35	3	136	182
	0,995	0,0108	1,57	4	145	215
	0,990	0,0144	3,12	14	216	564
0,976	0,995	0,0124	1,35	3	108	145
	0,994	0,0130	1,56	4	120	179
	0,992	0,0146	1,97	7	135	240
0,982	0,994	0,00866	3,14	14	363	947
	0,991	0,0129	3,13	14	240	628
0,970	0,994	0,0150	1,34	3	89,90	120
	0,990	0,0182	1,96	7	108	191

Планы контроля показателей надежности типа вероятность безотказной работы по последовательному методу ($\alpha = \beta = 0,2$)

$P_g(t)$	$P_a(t)$	a	r_0	r_{Σ}	n_0	n'
0,998	0,999	0,00144	2,00	7	1380	2710
0,997	0,999	0,00182	1,26	3	692	920
0,996	0,999 0,998	0,00216 0,00289	1,00 1,99	2 6	460 691	515 1350
0,995	0,999	0,00249	0,86	1	346	347
0,994	0,998	0,00364	1,26	3	345	459
0,992	0,998 0,996	0,00432 0,00577	1,00 1,99	2 6	230 344	256 673
0,990	0,998 0,995	0,00495 0,00722	0,86 1,99	1 6	112 215	173 538
0,994	0,997	0,00433	1,99	6	460	899
0,991	0,997	0,00545	1,26	3	230	306
0,988	0,997 0,996 0,994	0,00647 0,00729 0,00866	0,99 1,25 1,98	2 4 8	153 172 230	170 229 447
0,984	0,996	0,00865	0,99	3	114	127
0,980	0,996 0,990 0,995	0,00996 0,0144 0,0108	0,85 1,97 0,99	3 6 2	85,70 137 91,80	85,80 267 102
0,985	0,995	0,00906	1,25	4	137	183
0,975	0,995	0,0124	0,85	2	68,30	68,40
0,982	0,994 0,991	0,0109 0,0129	1,25 1,97	4 6	114 152	152 297
0,976	0,994	0,0130	0,99	2	75	84,50
0,976	0,992	0,0146	1,24	3	85,20	113
0,960	0,992	0,0174	0,98	2	56,50	63,0
0,973	0,991	0,0164	1,24	3	75,80	100,00
0,970	0,990	0,0182	1,23	2	67,80	90,20

Б7. ПЛАНЫ ОДНОСТУПЕНЧАТОГО КОНТРОЛЯ K_2

Испытаниям подвергается N восстанавливаемых изделий, испытания каждого из них заканчиваются в момент некоторого последнего восстановления, в целом они заканчиваются по достижении запланированного суммарного числа r событий «отказ + восстановление» (план $[N, B, r]$). Статистика суммируется по всем N изделиям. Распределения наработки между отказами и времени восстановления экспоненциальные. Решение принимается сравнением полученной оценки K_2^* с оценочным нормативом C .

Оценка K_2^* производится по формуле

$$K_2^* = T^*/(T^* + T_в^*),$$

где $T^* = \frac{1}{r} \sum_i^r t_i$; $T_в^* = \frac{1}{r} \sum_i^r \tau_i$, t_i и τ_i - i -е интервалы безотказной работы и восстановления соответственно.

В таблице Б7.1 приводятся планы испытаний (количество отказов r и оценочный норматив C) для ряда значений K_{21} , K_{20} и рисков α и β . Значение K_{21} выражено через отношение $(1 - K_{21})/(1 - K_{20})$, которое, как видно из таблицы, главным образом и определяет объём испытаний.

Таблица Б7.1

K_{20}	Планы испытаний для K_{21} при $(1-K_{21})/(1-K_{20})$									
	2,0		2,5		3,0		4,0		5,0	
	r	C	r	C	r	C	r	C	r	C
$\alpha = \beta = 0,05$										
0,9	33	0,857	18	0,839	12	0,822	—	—	—	—
0,95	39	0,929	22	0,920	14	0,914	9	0,898	7	0,882
0,97	40	0,943	23	0,936	16	0,930	9	0,920	7	0,908
0,98	41	0,958	24	0,952	16	0,948	10	0,949	8	0,930
0,98	42	0,972	25	0,968	17	0,965	11	0,959	8	0,955
0,99	44	0,986	25	0,984	18	0,982	11	0,980	8	0,978
0,995	44	0,993	26	0,992	18	0,991	11	0,990	9	0,983
0,998	45	0,9972	26	0,9968	18	0,9965	12	0,9959	9	0,9954
0,999	45	0,9986	26	0,9984	18	0,9983	12	0,9980	9	0,9977
0,9995	45	0,99929	26	0,99921	18	0,99914	12	0,99900	9	0,99890
0,9999	45	0,99986	26	0,99984	18	0,99983	12	0,99980	9	0,99977
$\alpha = \beta = 0,1$										
0,9	20	0,857	11	0,840	8	0,818	—	—	—	—
0,95	25	0,928	14	0,920	9	0,913	6	0,986	4	0,886
0,96	25	0,943	14	0,935	10	0,929	6	0,918	5	0,903
0,97	25	0,958	15	0,952	10	0,948	6	0,940	5	0,929
0,98	25	0,972	15	0,968	11	0,965	6	0,959	5	0,954
0,99	27	0,986	16	0,984	11	0,983	7	0,980	5	0,978
0,995	27	0,993	16	0,992	11	0,991	7	0,990	5	0,989
0,998	28	0,9972	16	0,9968	11	0,9965	7	0,9963	5	0,9957
0,999	28	0,9986	16	0,9984	11	0,9983	7	0,9980	5	0,9978
0,9995	28	0,99929	16	0,99921	11	0,99914	7	0,99900	5	0,99890
0,9999	28	0,99986	16	0,99984	11	0,99983	7	0,99980	5	0,99978

Б8. ПЛАНЫ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО КОНТРОЛЯ K_2

Испытаниям подвергается одно или несколько изделий. Распределения наработки между отказами и времени восстановления экспоненциальные. Если изделие одно, то оценка K_2 производится после каждого восстановления, так что объём испытаний определяется числом отказов (восстановлений) r . Если изделий несколько, статистика суммируется по всем экземплярам, но по каждому – только до последнего восстановления включительно. Расчёт K_2^* каждый раз производится по формуле

$$K_2^* = T^*/(T^* + T_в^*),$$

и результат (приёмка, браковка или продолжение испытаний) определяется по графику.

Графики построены заранее по формулам из [1], которые здесь не приводятся. График для трёх планов приведён на рис. Б8.1. Для других исходных данных графики приведены в ГОСТ 27.410 [13].

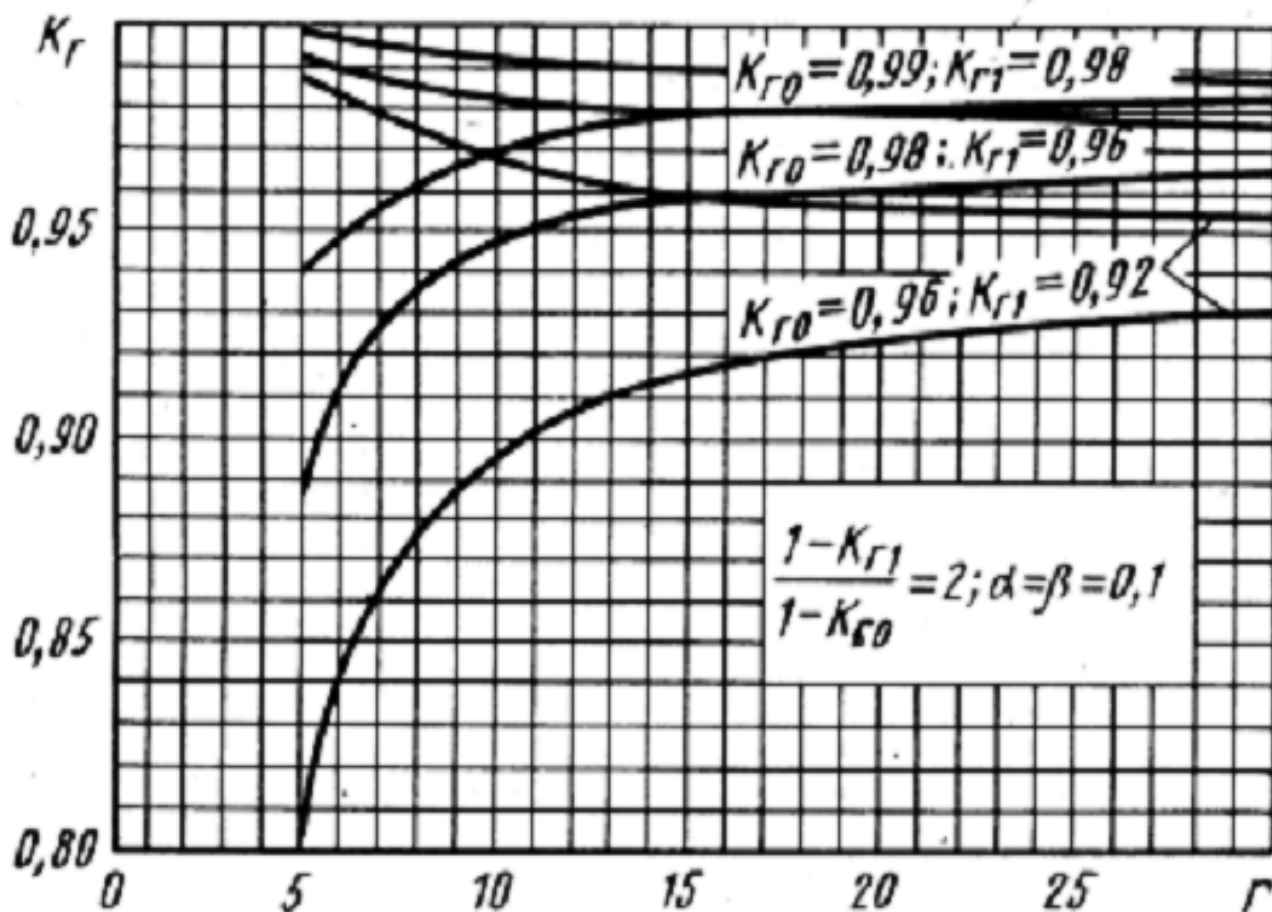


Рис.Б8.1