

М.Т. Прасов

Ю.С. Степанов

Эксплуатационная надежность электронных средств

Допущено ФГОУ ВПО «Госуниверситет-УНПК»
для использования в учебном процессе в качестве учебного пособия
для высшего профессионального образования

Орел 2011

УДК 621.396.6.019.3(075)

ББК 32.884-02я7

П70

Рецензенты:

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой
«Конструирования радиоэлектронных и микропроцессорных систем»
Государственного образовательного учреждения
высшего профессионального образования
«Тамбовский государственный технический университет»

Д.Ю. Муromцев,

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой
«Электротехника, электроника и автоматика»
Государственного образовательного учреждения
высшего профессионального образования
«Курский государственный технический университет»

В.М. Емельянов

Прасов, М.Т.

П70 Эксплуатационная надежность электронных средств: учебное пособие для
высшего профессионального образования / М.Т. Прасов, Ю.С. Степанов. – Орел:
ФГОУ ВПО «Госуниверситет-УНПК», 2011. – 238 с.: ил.

ISBN 978-5-93932-288-1

В пособии рассматриваются вопросы практического применения теории надежности для решения наиболее часто встречающихся типов задач. Изложены принципы и элементы теории эксплуатации, аналитические модели надежности электронных средств, способы контроля их состояния в процессе эксплуатации и профилактического обслуживания.

Предназначено для студентов старших курсов, обучающихся по специальностям: 210200 «Проектирование и технология электронных средств», 210201 «Проектирование и технология радиоэлектронных средств», 210202 «Проектирование и технология электронно-вычислительных средств», изучающих дисциплины «Эксплуатационная надежность электронных средств» и «Основы эксплуатации электронных и вычислительных средств».

Может быть полезна студентам других электронных специальностей, а также широкому кругу специалистов занимающихся конструкторско-технологическим проектированием и обеспечением надежности технических изделий.

УДК 621.396.6.001.3(075)

ББК 32.884-02я7

ISBN 978-5-93932-288-1

© ФГОУ ВПО «Госуниверситет-УНПК», 2011

Содержание

Предисловие.....	6
ГЛАВА 1. Общие сведения о проблеме надежности электронных средств...	8
1.1 Обзор современных электронных устройств и предъявляемые к ним требования.....	8
1.2 Условия эксплуатации электронных средств и факторы, влияющие на надежность.....	10
ГЛАВА 2. Надежность элементов – основное условие безотказной работы электронной аппаратуры.....	14
2.1 Основные термины и определения надежности.....	14
2.2 Интенсивность отказов элементов и меры по ее уменьшению.....	22
2.3 Условия применения и эксплуатации электроэлементов.....	26
2.4 Проверка режимов сопротивлений и конденсаторов на предельно допустимые эксплуатационные данные.....	34
ГЛАВА 3. Расчет показателей надежности ЭиВС.....	38
3.1 Краткие сведения из теории надежности.....	38
3.2 Примеры расчета надежности.....	44
3.3 Способы повышения надежности электронной аппаратуры.....	47
ГЛАВА 4. Основные показатели эксплуатационной надежности.....	50
4.1 Показатели надежности.....	50
4.2 Безотказность.....	53
4.3 Долговечность.....	57
4.4 Ремонтпригодность.....	60
4.5 Сохраняемость.....	62
4.6 Комплексные показатели надежности.....	62
4.7 Влияние различных факторов на показатели надежности.....	65
4.8 Сведения о законах распределения времени безотказной работы ЭиВС.....	76
ГЛАВА 5. Расчет надежности.....	81
5.1 Методы расчета надежности.....	81
5.2 Аналитические методы расчета безотказности.....	83
ГЛАВА 6. Методы повышения эксплуатационной надежности.....	87
6.1 Общие методы повышения надежности.....	87
6.2 Общие сведения о резервировании.....	92
6.3 Способы включения резерва.....	98
6.4 Оптимизация способов резервирования.....	103
ГЛАВА 7. Оценка показателей эксплуатационных свойств радиоэлектронной аппаратуры.....	105
7.1 Требования к эксплуатации аппаратуры.....	105
7.2 Задачи эксплуатации ЭиВС и их характеристики.....	107
7.3 Особенности оценки показателей эксплуатационных свойств ЭиВС по результатам эксплуатации.....	111
7.4 Оценка показателей безотказности.....	114
7.5 Оценка показателей долговечности.....	115

7.6	Оценка показателей сохраняемости.....	111
7.7	Оценка показателей ремонтпригодности.....	118
7.8	Показатели эксплуатационных свойств ЭиВС.....	120
7.9	Коэффициент готовности.....	121
7.10	Трудоемкость технического обслуживания.....	123
7.11	Трудоемкость ремонтов.....	126
7.12	Коэффициент технического использования.....	128
7.13	Коэффициент оперативной готовности.....	131
7.14	Эффективность технического обслуживания.....	132
7.15	Коэффициент стоимости эксплуатации.....	134
ГЛАВА 8	Основы теории ремонтпригодности ЭиВС при эксплуатации.....	136
8.1	Ремонтпрогодность ЭиВС и факторы, влияющие на нее.....	136
8.2	Техническое обслуживание. Методы текущих ремонтов ЭиВС.....	138
8.3	Распределение времени текущего ремонта.....	142
8.4	Поиск неисправных элементов в ЭиВС.....	144
8.5	Расчет ремонтпрогодности аппаратуры.....	149
8.6	Оценка ремонтпригодности на основании статистических данных при эксплуатации ЭиВС.....	154
8.7	Стоимость обслуживания ЭиВС.....	157
ГЛАВА 9	Техническое обслуживание электронной аппаратуры.....	162
9.1	Техническое обслуживание и его организация.....	162
9.2	Периодичность и объем профилактических работ на непрерывно работающей аппаратуре.....	166
9.3	Периодичность и объем профилактических работ на дежурной аппаратуре.....	167
9.4	Прогнозирование отказов ЭиВС.....	168
ГЛАВА 10	Основные понятия эксплуатационного обслуживания ЭиВС.....	170
10.1	Основные эксплуатационные характеристики ЭВМ.....	170
10.2	Эксплуатационная надежность ЭВМ.....	176
10.3	Особенности ЭВМ как объекта эксплуатационного обслуживания.....	182
10.4	Системный подход при разработке концепции и аппаратурно-программных средств обслуживания ЭВМ. Технология: «Надежность – Готовность – Обслуживаемость».....	184
10.5	Некоторые сведения из теории вероятностей.....	187
10.6	Модели потоков отказов и сбоев в ЭВМ.....	193
ГЛАВА 11	Организация эксплуатации и ремонта ЭиВС.....	195
11.1	Основные задачи эксплуатации.....	195
11.2	Организация службы контроля измерительных приборов.....	196
11.3	Обслуживание и ремонт электронных средств.....	198
11.4	Особенности эксплуатации устройств вычислительной техники.....	200
11.5	Метрологическое обеспечение производства.....	202
11.6	Техника безопасности при эксплуатации электронных средств.....	205
ГЛАВА 12	Основы теории расчета необходимого комплекта запасных элементов для ЭиВС.....	207

12.1 Общие положения о комплектации ЭиВС запасными элементами. Основные определения.....	207
12.2 Критерии оценки достаточности комплекта запасных элементов.....	208
12.3 Математическая модель процесса обеспечения аппаратуры запасными элементами одного типонаминала (группы).....	210
12.4 Методы определения норм комплектования запасными частямиЭС.....	212
12.5 Исходные данные для определения номенклатуры и потребности необходимых запасных частей.....	213
12.6 Расчет ресурса элементов для заданных условий эксплуатации.....	216
12.7 Расчет количества запасных частей.....	219
Приложения.....	223
Литература.....	237

Предисловие

Быстрый рост числа ЭВМ и других электронных средств и в особенности микро-ЭВМ и микропроцессорных устройств в различных отраслях народного хозяйства, науки, системе образования и в быту, породил проблему сохранения и поддержания их работоспособности в условиях эксплуатации. Известно, что внедрение электронных и вычислительных изделий является одним из важнейших средств повышения производительности труда в различных областях человеческой деятельности, производительности и эффективности технологических процессов. Нельзя допустить, чтобы из-за неисправности электронного изделия и плохо организованной эксплуатации возникли, значительные экономические потери и использование электронных и вычислительных средств ЭИВС оказалось, малоэффективным.

Поэтому для повышения эффективности применения ЭИВС, необходимо повышение их эксплуатационной надежности и готовности, снижение трудовых затрат на техническое обслуживание ЭИВС в процессе эксплуатации.

В настоящее время в различных вузах учебные программы по надежности и эксплуатации ЭИВС существенно различаются по объему и содержанию. Недостаточно изложены вопросы эксплуатационной надежности и технического обслуживания ЭИВС в процессе эксплуатации изделий на объекте и обеспечение их запасными изделиями. Это определяло необходимость рассмотрения в данном учебном пособии многих разделов по расчету эксплуатационной надежности, основам теории и расчета необходимого комплекта запасных изделий для ремонта и восстановления работоспособности ЭИВС в процессе эксплуатации, профилактики и технического обслуживания ЭИВС.

Эксплуатационная надежность является одной из основных проблем современной техники в процессе ее внедрения и эксплуатации. Для повышения надежности широко используются разнообразные методы, затрагивающие вопросы технологии, конструкции, структуры и правил эксплуатации ЭИВС.

Проблема эксплуатации ЭИВС объединяет самые разнообразные вопросы – от непосредственного использования аппаратуры до планирования, технического обслуживания и снабжения.

В работе делается попытка систематизировать задачи эксплуатации ЭИВС и раскрыть ее основные вопросы с общих позиций эксплуатационной надежности. Кроме того, излагаются сравнительно новые вопросы: обеспечение и расчет необходимого для эксплуатации комплекта запасных изделий, контроль состояния ЭИВС в процессе эксплуатации и др.

В пособии рассмотрены элементы теории эксплуатации ЭИВС, эксплуатационная надежность, методы, средства и процессы эксплуатационного обслуживания их технического обеспечения. Изложены элементы теории и аналитические модели эксплуатационной надежности ЭИВС.

В пособии изложены принципы и средства обеспечения высокой стоимости обслуживаемости ЭИВС. Описаны принципы построения и использования, создающие основы для эксплуатационного обслуживания системы автоматизированного контроля и диагностики правильности работы ЭИВС. Основы теории и расчета не-

обходимого комплекта запасных элементов для ремонта и восстановления ЭиВС в процессе эксплуатации, а также критерии оценки достаточности комплекта запасных элементов.

Учебное пособие рассчитано на студентов, аспирантов и инженеров, обладающих знаниями теории надежности, теории массового обслуживания и теории множеств в объеме программы направление 654300 «Проектирование и технология электронных средств» по специальностям 210200 210201 и 210202, а также других электронных специальностей.

ГЛАВА 1. Общие сведения о проблеме надежности электронных средств

1.1. Обзор современных электронных устройств и предъявляемые к ним требования

Электронная аппаратура выпускается промышленностью в течение нескольких десятков лет. Однако до второй половины XX века не существовало самостоятельной проблемы обеспечения ее безотказной работы. Это объясняется тем, что электронная аппаратура, была сравнительно простой, т. е. состояла из ограниченного количества элементов, которые редко отказывали в работе. Из этого, конечно, не следует, что прежде вообще не ставился вопрос об обеспечении безотказной работы электронного оборудования, особенно на сложных объектах. Однако в то время и в тех условиях при существовавшем уровне развития науки и техники задачи обеспечения надежности работы приборов и машин не могли выделиться в самостоятельную проблему. В последние десятилетия повышение надежности работы аппаратуры превратилось в одну из важнейших народнохозяйственных задач. Это объясняется непрерывным усложнением аппаратуры, т. е. ростом числа элементов, из которых она состоит, причем темпы роста количества элементов превышают темпы улучшения их качества. Сложность современной аппаратуры обусловлена сложностью решаемых ею задач и повышением требований к точности ее работы. К ней все в большей мере переходят от человека функции контроля и управления производственными и другими процессами. В связи с этим повышаются требования к ее точности и надежности.

Таким образом, снижение надежности работы аппаратуры ввиду ее усложнения и возрастание требований к надежности привели к появлению новой отрасли науки – теории надежности.

К большим экономическим потерям может привести ненадежная работа аппаратуры в автоматизированных системах управления, широко используемой в промышленности, на транспорте, в связи и т. д. Не меньшее экономическое значение имеет и то, что на устранение различных неисправностей аппаратуры приходится затрачивать большие средства, а ремонт за счет предприятий в период гарантийного срока службы повышает себестоимость продукции,

Все это свидетельствует о том, что повышение надежности работы электронного оборудования является актуальной задачей.

Многие ученые А. И. Берг, В. И. Сифоров, Н. Г. Бруевич, Г. В. Дружинин, И. И. Морозов и другие внесли большой вклад в развитие теории надежности. В предисловии к книге «Надежность наземного радиоэлектронного оборудования» акад. А. И. Берг писал: «Требование к надежности аппаратуры диктуется самой жизнью. Повышение насыщенности народного хозяйства и армии радиоэлектронным оборудованием, решающим ответственные задачи, делает необходимым непрерывное поддержание ее в рабочем состоянии или в состоянии постоянной готовности к действию. Ни одно достижение науки и техники, сколь бы эффективно оно ни было, не

может быть полноценно использовано, если его реализация будет зависеть от «капризов» малонадежной аппаратуры» [9].

Рассмотрим, какие требования предъявляются к качеству электронной аппаратуры.

Аппаратура должна обладать такими значениями параметров (быстродействием, объемом памяти, коэффициентом усиления, чувствительностью, и др.), которые определены техническими условиями. Параметры аппаратуры должны удовлетворять нормам ТУ также и в предусмотренных условиях эксплуатации (пределы рабочих температур, уровень влажности, давление, динамические нагрузки, время непрерывной работы и пр.).

После того как в процессе изготовления, регулировки и заводских приемосдаточных испытаний предусмотренные ТУ параметры получены, возникает вопрос: будет ли аппаратура работать достаточно продолжительно. Кроме того, очень важно знать, будет ли аппаратура в заданных условиях работать безотказно, с какой степенью уверенности можно рассчитывать на ее исправное состояние — иными словами, окажется ли аппаратура достаточно надежной.

Продолжительность жизни аппаратуры оценивают сроком службы (долговечностью). Например, можно условно считать, что срок службы современного прибора свыше десяти лет. В пределах этого срока службы наблюдается ряд неисправностей, однако после их устранения прибор вновь будет удовлетворять предъявляемым к нему требованиям. За пределами срока службы дальнейшая эксплуатация прибора станет невыгодной, так как неизбежен его капитальный ремонт, что будет стоить дороже, чем приобретение нового прибора. Однако это относится не ко всей аппаратуре. Например, сложная электронная система в пределах своего срока службы несколько раз подвергается среднему или капитальному ремонту (если она не успевает устареть в техническом отношении).

Следовательно, сроком службы (долговечностью) изделия считается время от начала эксплуатации до наступления технической или экономической нецелесообразности дальнейшего использования.

Необходимо заметить, что по отношению к элементам электронных схем (интегральным схемам, полупроводниковым приборам, конденсаторам, сопротивлениям и др.), а также не подлежащим ремонту узлам (например, модулям) сроком службы следует называть время, протекающее до первой неисправности. Некоторую часть общего срока службы составляет гарантийный срок службы изделия представляющий некоторое условное календарное или рабочее время, в течение которого завод-изготовитель производит безвозмездное устранение неисправностей.

Требование возможно большего срока службы предъявляется не ко всем изделиям.

Исходя из выше изложенного, можно дать определение надежности. Надежностью называется свойство изделия (элемента, блока, прибора, системы) сохранять свои параметры в заданных пределах и в заданных условиях эксплуатации [7, 9, 15]. В отличие от долговечности, надежность является требованием всеобщим, т. е. относящимся ко всем изделиям.

Следует подчеркнуть, что надежность является важнейшим техническим параметром аппаратуры, ее внутренним свойством, имеющим не меньшее значение, чем такие параметры, как коэффициент усиления, мощность, чувствительность и др. Поэтому ее количественное выражение обязательно должно указываться в технических условиях на изделие в разделе «Технические требования».

Надежность, как параметр имеет и свои особенности по сравнению с другими техническими параметрами аппаратуры. Эти особенности заключаются, в частности в том, что на надежность оказывают влияние главным образом случайные факторы, внешние и внутренние, с которыми связано решение проблемы надежности.

Кроме того, в отличие от других технических параметров, надежность определяется несколькими количественными показателями. Определить эти показатели экспериментально довольно трудно, так как требуется длительное наблюдение за работой аппаратуры, или ее испытания.

Наука о надежности электронной аппаратуры занимается изучением факторов, влияющих на надежность, а также разработкой способов повышения надежности и методов расчета и измерения величин, характеризующих надежность (количественных характеристик надежности).

1.2. Условия эксплуатации электронных средств и факторы, влияющие на надежность

Надежность аппаратуры заметно зависит от условий эксплуатации. Чем тяжелее эти условия, тем ниже надежность. Поэтому одной из причин недостаточной надежности является использование современной электронной аппаратуры в крайне неблагоприятных условиях (широкий диапазон температур, вибрации, повышенная влажность и т. д.).

Кратко рассмотрим условия эксплуатации и их воздействие на аппаратуру.

Температура окружающей среды. Электрические параметры элементов схемы и механические свойства деталей конструкции существенно зависят от температуры. В результате изменения параметров элементов происходит изменение электрических параметров приборов, в состав которых входят данные элементы. Вследствие изменений температур ослабляются крепления деталей и узлов, нарушаются посадочные и установочные зазоры, происходят деформации и взаимные смещения деталей. Помимо ухудшения механической прочности конструкции это влечет за собой изменение первоначальных емкостных связей между цепями, что приводит к нарушению работы схемы. Как правило, аппаратура должна работать в широком диапазоне температур, что необходимо учитывать при ее конструировании.

Температура в наиболее холодных районах земного шара достигает -70 и даже -80°C , а в наиболее жарких до $+60^{\circ}\text{C}$. Для некоторых районов, в которых эксплуатируется аппаратура, характерны значительные суточные колебания температуры (в пустынях температура в течение суток может изменяться на 40°C). Температура изменяется также с высотой и в северных районах.

Практически пределами рабочих температур принято считать:

а) для полевой, автомобильной и морской аппаратуры от -50 до +65°С;

б) для авиационной аппаратуры от -60 до +80° С.

Влажность. Повышенная относительная влажность (выше 70%) вызывает изменение электрических параметров элементов, набухание гигроскопических материалов (картона, некоторых пластмасс и др.), коррозию металлов. Наиболее опасным результатом воздействия повышенной влажности является резкое снижение качества изоляции.

Вся выпускаемая аппаратура (исключая устанавливаемую в закрытом отапливаемом помещении) должна рассчитываться на работу в условиях относительной влажности воздуха, доходящей до 100%.

Плотность воздуха. С уменьшением давления существенно изменяются диэлектрическая проницаемость и электрическая прочность воздуха. Таблица 1.1 дает представление о снижении электрической прочности воздуха, при уменьшенном давлении.

Таблица 1.1

Зависимость электрической прочности воздуха от давления

Давление, мм рт. ст.	Пробивное напряжение для зазоров, кв			
	10 мм	5 мм	1 мм	0,2 мм
750	22	16	5	2
600	18,7	13,5	4,2	1,7
450	15	11,8	3,4	1,35
300	11,2	8,8	2,6	1
150	8	6,2	1,8	0,7
100	5,2	4	1,4	0,45
50	3,1	2,4	0,8	0,25

Вся наземная аппаратура должна быть рассчитана на работу при атмосферном давлении от 500 до 780 мм рт. ст. Морская радиоаппаратура может испытывать изменения атмосферного давления от 720 до 780 мм рт. ст.

Наиболее жесткие требования, естественно, предъявляются к самолетной аппаратуре. Она должна работать в условиях, когда атмосферное давление лежит в пределах от 5 до 780 мм рт. ст.

Динамические нагрузки. Автомобильная, самолетная и морская аппаратура в процессе эксплуатации подвергается вибрации, воспринимаемой от работающих двигателей. Кроме того, неизбежна ударная нагрузка, возникающая при транспортировке аппаратуры по плохим дорогам и в некоторых других случаях.

Рассмотрим факторы, влияющие на надежность аппаратуры. Надежность закладывается в изделие в процессе проектирования. При проектировании аппаратуры следует учитывать следующие факторы, влияющие на надежность.

Количество применяемых элементов и деталей. Разработчик обязан найти наиболее простое конструктивное и схемное решение, которое в то же время обеспечит выполнение технического задания. Следует помнить, что чем проще аппаратура т. е. чем меньше она содержит элементов, тем она надежнее.

Надежность элементов и деталей. Высокая надежность элементов обеспечивает и высокую надежность аппаратуры. Например, два блока, предназначенные для выполнения одинаковых функций и имеющие одинаковое количество элементов, могут обладать совершенно различной надежностью, если один из них выполнен на цифровых элементах, а другой – на аналоговых элементах.

Правильность выбора типов электрических элементов. При выборе типов элементов необходимо следить, чтобы условия применения элементов, предусмотренные ТУ, ГОСТ и нормами, соответствовали условиям эксплуатации (температура, влажность, давление, ударные и вибрационные нагрузки и т. д.).

Режимы работы элементов и окружающая температура. Для повышения надежности элементов следует при разработке аппаратуры стремиться к облегчению режимов их работы. Недопустимо, чтобы элементы использовались при токах, напряжениях или мощностях, превышающих предельно допустимые значения.

Снижение температуры внутри блоков также является важным фактором повышения надежности.

Стандартизация узлов, элементов и деталей, технологичность конструкции. Унифицированные узлы и элементы, выпускаемые специализированными предприятиями, имеют более высокую надежность. Технологичные конструкции уменьшают количество дефектов при сборке и монтаже аппаратуры.

Доступность для осмотра и ремонта. Хорошая доступность для осмотра и ремонта обеспечивает сокращение времени, необходимого для поиска и устранения неисправности, а также для проведения профилактических работ.

Достигнутая при проектировании надежность является расчетной. При изготовлении данного образца важно обеспечить установленную надежность или даже превзойти ее. Необходимую надежность изготавливаемого образца можно обеспечить:

- а) высоким качеством технологии и строжайшим ее соблюдением на всех стадиях производства;
- б) тщательным контролем на соответствие ГОСТ, нормам или ТУ всех элементов, деталей и узлов, поступающих от предприятий-поставщиков, нельзя использовать элементы, детали и узлы, срок хранения которых превысил допустимый;
- в) квалифицированным техническим контролем за соответствием чертежам и техническим условиям на всех стадиях производства;
- г) высокой культурой производства (ритмичной работой предприятия, чистотой и т. д.).

Заложенную при проектировании и обеспеченную при производстве надежность необходимо дольше сохранять в процессе эксплуатации. Для этого следует выполнять все мероприятия, предусмотренные технической документацией, бережно отно-

ситься к аппаратуре, предохранять ее от неблагоприятно воздействующих внешних факторов.

Согласно [3, 7, 8], 64% неисправностей возникают из-за ошибок при проектировании и производстве, а также вследствие недостаточной надежности элементов, 36% неисправностей происходят из-за неправильной эксплуатации. Отсюда следует, что эксплуатационные факторы надежности имеют существенное значение.

ГЛАВА 2. Надежность элементов. Основное условие безотказной работы электронной аппаратуры

2.1. Основные термины и определения надежности

Всякая электронная аппаратура собирается из отдельных элементов или деталей, которые подразделяются на электрические (электроэлементы) и механические (переключатели, двигатели и т. п.). К электроэлементам относятся электронные и ионные приборы, интегральные схемы, полупроводниковые диоды и триоды, сопротивления, конденсаторы, катушки индуктивности и некоторые другие изделия. Такие изделия, как трансформатор или реле, следовало бы отнести к узлам, так как они сами состоят из целого ряда деталей и, в отличие от сопротивлений или конденсаторов, в некоторых случаях их можно ремонтировать. Однако в теории надежности трансформаторы и реле также принято относить к электроэлементам, поскольку именно они, а не детали, из которых они состоят, выполняют определенные функции в электрической схеме.

Все перечисленные электроэлементы будем называть элементами электрической схемы или просто элементами.

К механическим элементам или деталям относятся шасси, кожухи, панели, шкалы, ручки управления, установочные, крепежные и декоративные детали и др. Условимся все механические элементы или детали называть в дальнейшем элементами кинематической схемы и конструкции.

Элементы собирают в блоки. Каждый блок выполняет вполне определенные функции (например, блок управления, ОЗУ, ПЗУ, блок питания и др.). Группа блоков обычно объединяется в прибор, представляющий конструктивно самостоятельное устройство. Два или несколько устройств могут составлять систему, предназначенную для решения сложных и ответственных задач, имеющих самостоятельное функциональное назначение.

Отказ – это событие, которое приводит к невозможности использования хотя бы одного из рабочих свойств элемента или системы [7, 8, 15]. Отказ имеет место и тогда, когда элемент или система остаются работоспособными, но их параметры вышли за пределы допустимых значений (например, снизилась точность).

Различают внезапные и постепенные отказы. Внезапный отказ предвидеть невозможно, так как он возникает в результате многих, не поддающихся учету причин. Поэтому внезапные отказы носят случайный характер.

Постепенные отказы возникают в результате развития процессов износа и старения (происходит более или менее плавное изменение соответствующего параметра элемента). Когда данный параметр достигает некоторого критического значения, наступает отказ, поэтому постепенные отказы носят не случайный, а закономерный характер, их появление можно предвидеть и предотвратить своевременным проведением профилактических работ.

Отказ – это основная неисправность, поскольку при этом элемент или система теряют полностью (или частично) свои рабочие свойства. Могут возникнуть второ-

степенные неисправности, при которых элемент или система не теряют своих рабочих свойств (например, порча защитных или декоративных покрытий).

Рассмотренные выше положения дают основание сделать вывод о том, что надежность можно также характеризовать, как способность изделия работать безотказно (т. е. без основных неисправностей) в заданных условиях эксплуатации.

Если в состав некоторой системы входят только необходимые элементы, узлы или блоки и отсутствуют резервные, то отказ хотя бы одного элемента приводит к выходу из строя всей системы. Такое соединение элементов принято называть основным, или последовательным. Если в системе имеются резервные элементы, узлы или блоки, то отказ ее наступает лишь тогда, когда выходит из строя основной и заменяющий его резервный элемент, узел или блок. Такое соединение элементов называют резервным, или параллельным.

Понятие «надежность» является настолько сложным, что для ее численного выражения приходится использовать различные количественные характеристики надежности: одни из них удобны для оценки надежности элементов, другие применяются для определения надежности систем. Некоторые характеристики используются для оценки надежности, как элементов, так и систем, т. е. являются универсальными.

Работа элементов и систем характеризуется тремя этапами.

Первый этап - начальный. На этом этапе выходит из строя относительно большое число элементов и соответственно случается много отказов в системах. На начальном этапе отказывают наименее надежные элементы, т. е. те, в которых были допущены скрытые производственные дефекты. Помимо этого в готовых системах выявляются ошибки, допущенные при сборке и монтаже. Желательно, чтобы начальный этап, называемый также этапом приработки, заканчивался на заводе-изготовителе систем. Это достигается длительным прогоном аппаратуры, а также тренировкой элементов перед поступлением на сборку и монтаж.

Однако часто аппаратура поступает в эксплуатацию, когда еще не закончен этап приработки, который может длиться десятки и сотни часов, и поэтому не случайно новую аппаратуру иногда рассматривают как менее надежную, чем приработавшуюся.

Второй этап – нормальная работа. Это наиболее продолжительный этап. На этом этапе процесс приработки закончен, а износ и старение еще не наступили. Все дефекты сборки и монтажа уже выявились, наименее надежные элементы отказали. Внезапные отказы элементов происходят сравнительно редко. Задача разработчиков, производственников и лиц, обслуживающих аппаратуру во время ее эксплуатации, сводится к тому, чтобы продлить период нормальной работы, за счет соблюдения всех требований технической документации.

Третий этап – этап износа и старения. Даже при тщательном проектировании системы, образцовом ее изготовлении и бережной эксплуатации наступает период, когда неисправности происходят все чаще – сказываются неизбежные процессы износа и старения элементов. На третьем этапе возникает необходимость в среднем или капитальном ремонте.

Выражая надежность количественно, можно объективно сравнивать различные типы и образцы аппаратуры по надежности, задаваться необходимым уровнем надежности в тактико-техническом задании наравне с другими параметрами и осуществлять контроль за достигнутым уровнем надежности в процессе производства, испытаний и эксплуатации.

Рассмотрим количественные характеристики надежности.

Интенсивность отказов. Интенсивностью отказов называется отношение числа отказавших изделий в единицу времени к среднему числу изделий, продолжающих исправно работать.

На основании этого определения интенсивность отказов

$$\lambda(\Delta t) = \frac{\Delta n}{N_{\varphi}(\Delta t)\Delta t}, \quad (2.1)$$

где Δn - число изделий, отказавших за время Δt ;

$$N_{\varphi}(\Delta t) = \frac{N_{i-1} + N_i}{2}, \quad (2.2)$$

где N_{i-1} - число исправно работающих изделий в начале интервала времени Δt ;

N_i - число исправно работающих изделий в конце интервала времени Δt .

Пример определения интенсивности отказов.

Пусть в начале промежутка времени $\Delta t = 100$ час. имелось 10 000 исправных изделий, а в конце осталось 9800. Следовательно, среднее число исправно работающих изделий

$$N_{\varphi}(\Delta t) = \frac{10000 + 9800}{2} = 9900$$

$\Delta n = 10\,000 - 9800 = 200$ (изделий).

На основании формулы (2.1)

$$\lambda(\Delta t) = \frac{200}{9900 * 100} = 0.202 * 10^{-3} \text{ 1/час}$$

Интенсивность отказов, называемая иногда также λ -характеристикой, или интенсивностью отказов, широко используется для характеристики надежности элементов, так как ее нетрудно определить экспериментально. Для этого надо поставить на испытания достаточно большое число элементов с тем, чтобы иметь возможность наблюдать некоторое число отказов в течение приемлемого для проведения испытаний отрезка времени (в нашем примере 100 часов).

Сокращение отрезка времени Δt дает возможность более точно следить за изменениями величины интенсивности отказов во времени.

Интенсивность отказов показывает, какая часть элементов по отношению к среднему числу исправно работающих выходит из строя в единицу времени (обычно в час).

Следует заметить, что рассмотренная методика измерения интенсивности отказов за конечные промежутки времени Δt приводит к ступенчатому характеру кривой

$$\lambda(\Delta t) = f(t).$$

Заканчивая рассмотрение понятия «интенсивность отказов», необходимо отметить его важное значение в теории надежности, так как эта величина лежит в основе расчетов на надежность.

Среднее время исправной работы. Средним временем исправной работы изделий называется среднее арифметическое времен исправной работы каждого образца.

Если имеется N_0 образцов, время исправной работы которых соответственно $t_1, t_2, t_3, \dots, t_{N_0}$, то среднее время исправной работы

$$T_{cp} = \frac{t_1 + t_2 + t_3 + \dots + t_{N_0}}{N_0} \quad (2.3)$$

Подсчет по этой формуле затрудняется тем, что необходимо знать моменты выхода из строя каждого испытуемого изделия.

Обычно известно число образцов, отказавших в каждом интервале времени. В этом случае среднее время исправной работы T_{cp} определяют по формуле

$$T_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^m \Delta n_i t_{cp_i}}{N_0}, \quad (2.4)$$

где Δn_i – число изделий, вышедших из строя в i -том интервале времени;
 m – число интервалов наблюдения. При этом

$$t_{cp_i} = \frac{t_{i-1} + t_i}{2}, \quad (2.5)$$

где t_{i-1} – время в начале i -го интервала;

t_i – время в конце i -го интервала.

Среднее время исправной работы часто применяют для характеристики надежности элементов, а также узлов и систем, не подлежащих ремонту. На этапе нормальной работы, т. е. при $\lambda = const$ между интенсивностью отказов и средним временем исправной работы существует обратная зависимость, т. е. $\lambda = 1/T_{cp}$. Для того, чтобы убедиться в этом, а также лучше уяснить смысл понятия «интенсивности отказов» и «среднее время исправной работы», воспользуемся табл. 2.1, в которой представлены взятые произвольно результаты испытаний 1000 элементов, находящихся на этапе нормальной работы, т. е. у которых $\lambda(t) = const$.

Приведенные в табл. 2.1 значения интенсивности отказов определены по формуле

$$\lambda(\Delta t) = \frac{\Delta n}{N_{cp}(\Delta t)\Delta t} \quad (2.6)$$

Как видно из табл. 2.1, интенсивность отказов остается приблизительно постоянной и близкой к 0,5 * (приблизительное постоянство λ свидетельствует, что все элементы выходят из строя до наступления износа). Это означает, что в течение каждого часа выходит из строя примерно половина элементов.

Таблица 2.1

Результаты испытаний 1000 элементов

Время испытаний, час.	Количество элементов, вышедших из строя	Количество оставшихся элементов	Опасность отказов λ , 1/час
1	400	600	0,50
2	250	350	0,52
3	140	210	0,50
4	80	130	0,47
5	50	80	0,48
6	30	50	0,46
7	20	30	0,50
8	12	18	0,40
9	8	10	0,57
10	4	6	0,50
11	3	3	0,66

При этом среднее время исправной работы составит около 2 час. Это подтверждает и расчет по формуле (2.4)

$$T_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^m \Delta n_i t_{cp_i}}{N_0} = \frac{400 \cdot 0,5 + 250 \cdot 1,5 + 140 \cdot 2,5 + 80 \cdot 3,5 + 0,5 \cdot 4,5 + 30 \cdot 5,5 + 20 \cdot 6,5 + 12 \cdot 7,5 + 8 \cdot 8,5 + 4 \cdot 9,5 + 3 \cdot 10,5 + 1 \cdot 11,5}{1000} = 1,96 \text{ час}$$

Если бы интенсивность отказов $\lambda = 0,33$ 1/час, то это означало бы, что каждый час выходит из строя приблизительно 1/3 элементов и среднее время исправной работы составляет 3 часа.

Среднее время между двумя соседними отказами. Средним временем между двумя соседними отказами называется среднее арифметическое времен исправной работы между соседними отказами.

Согласно определению, среднее время исправной работы между отказами можно определить

$$t_{cp} = \frac{t_1 + t_2 + \dots + t_n}{n} \quad (2.7)$$

где t_1 – время работы до первого отказа;

t_2 – время работы между первым и вторым отказами;

t_n – время работы между $n-1$ и n отказами;

n – число отказов за время испытаний.

Из определения среднего времени между двумя соседними отказами следует, что данное понятие приемлемо лишь для систем, а также узлов, которые подлежат ремонту, т.е. восстанавливаемым блокам. Однако на практике понятием t_{cp} характеризуют только системы (блоки, приборы и т.п.), а надежность узлов, так же как и элементов, характеризуют величиной интенсивности отказов.

Величина t_{cp} может определяться по данным испытания одного или нескольких однотипных образцов. В первом случае можно пользоваться формулой (2.7), а во втором t_{cp} необходимо определять по формуле

$$t_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^{i=M} t_{cp_i}}{M}, \quad (2.8)$$

где M – число испытываемых образцов;

t_{cp_i} – среднее время между соседними отказами i -го образца.

На участке нормальной работы (приработка закончена, а износ не наступил) $t_{cp} = T_{cp}$, т. е. среднее время между соседними отказами равняется среднему времени исправной работы до первого отказа.

Пример расчета среднего времени между двумя соседними отказами.

Испытываются 3 образца.

Образец 1 исправно работал до первого отказа 25 час, между первым и вторым отказами – 30 час., между вторым и третьим отказами – 28 час.

На основании формулы (2.8) среднее время между соседними отказами первого образца

$$t_{cp_1} = \frac{25 + 30 + 28}{3} = \frac{83}{3} \approx 28 \text{ час}$$

Образец 2 исправно работал до первого отказа 20 час, между первым и вторым отказами – 24 час, между вторым и третьим – 18 час и между третьим и четвертым – 28 час, откуда

$$t_{cp_2} = \frac{20 + 24 + 18 + 28}{4} = \frac{90}{4} = 22,5 \text{ час}$$

Образец 3 исправно работал до первого отказа 25 час, между первым и вторым отказами – 23 час, между вторым и третьим – 26 час. и между третьим и четвертым – 28 час.

Следовательно,

$$t_{cp} = \frac{25 + 23 + 26 + 28}{4} = \frac{102}{4} = 25,5 \text{ час}$$

Среднее время между соседними отказами всех трех образцов на основании формулы (2.8)

$$t_{cp} = \frac{28 + 22,5 + 22,5}{3} = \frac{76}{3} \approx 25 \text{ час}$$

Вероятность безотказной работы. Под вероятностью безотказной работы $P(t)$ понимают вероятность того, что в заданном интервале времени непрерывной работы не будет отказов. Величина вероятности исправной работы зависит от интервала времени, и чем больше этот интервал, тем меньше вероятность,

Вероятность безотказной работы характеризует как элементы, так и системы. Однако на практике она гораздо чаще используется для характеристики надежности систем.

Вероятность безотказной работы в течение конечных интервалов времени может иметь значения

$$0 < P(t) < 1 \quad (2.9)$$

Пусть, например, $P(t) = 0,5$. В этом случае половина систем, обладающих таким значением вероятности безотказной работы в течение времени t , выйдет из строя, а другая половина будет продолжать работать.

Вероятность безотказной работы $P(t)$ и среднее время между соседними отказами t_{cp} являются важнейшими характеристиками надежности систем.

Если аппаратура в соответствии с ее тактическим назначением должна непрерывно работать в течение ограниченного отрезка времени, то для определения ее надежности лучше пользоваться величиной вероятности безотказной работы в течение требуемого времени. Чем вероятность выше, тем аппаратура надежнее.

Для определения надежности аппаратуры, которая должна постоянно находиться в рабочем состоянии, лучше пользоваться величиной среднего времени между соседними отказами. Чем больше это время, тем надежнее система.

Общим недостатком всех количественных характеристик надежности является их вероятностный характер, т. е. никогда нельзя достоверно сказать о данном конкретном элементе или образце аппаратуры, что они будут безотказно работать или же наоборот выйдут из строя, и если произойдет отказ, то в какой момент времени.

Все рассмотренные характеристики не могут определять надежность в полной мере. Представим некую условную систему, обладающую весьма низкими значениями $P(t)$ и t_{cp} , но кратковременный отказ которой не вносит каких-либо нарушений в нормальный ход эксплуатации. Если конструкция предусматривает автоматическое выявление неисправного узла или блока и возможность их быстрой замены, то такая система имеет преимущества перед аппаратурой с такими же значениями $P(t)$ и t_{cp} , но не содержащей цепей автоматического выявления неисправностей.

Приведем определения некоторых дополнительных характеристик надежности, которые в сочетании с рассмотренными выше основными характеристиками позволяют более полно определить надежность.

Коэффициентом профилактики называется отношение числа часов, затраченных на профилактику и ремонт аппаратуры, ко времени ее исправной работы, взятых за один календарный срок.

Коэффициент профилактики нельзя считать основной характеристикой надежности. Это подтверждается следующим примером. Представим себе две системы, имеющие одинаковый коэффициент профилактики, но обладающие совершенно различной надежностью. Одна из них, например, проработала 28 суток и лишь затем наступил отказ, потребовавший одних суток для ремонта; кроме того, одни сутки затрачены на производство профилактических работ. Таким образом, за месяц коэффициент профилактики этой системы

$$k_{np_1} = \frac{2}{28} = 0.07$$

Другая система в течение месяца исправно проработала тоже 28 дней; однако за это время произошло три отказа – на восьмой, пятнадцатый и двадцать пятый день. При этом на устранение всех трех неисправностей и профилактику потребовалось также двое суток. Значит, коэффициент профилактики второй системы

$$k_{np_2} = \frac{2}{28} = 0.07$$

имеет то же значение, что и коэффициент профилактики первой системы, хотя первая система должна быть признана более надежной.

Частотой профилактики аппаратуры называется отношение числа ремонтов (в том числе и профилактических) к сумме времени исправной работы и вынужденного простоя в течение определенного календарного срока.

Для рассмотренного примера (если считать, что в течение месяца проводится один профилактический ремонт) частота профилактики первой системы

$$f_{p_1} = \frac{2}{30} = 0.06$$

второй системы

$$f_{p_2} = \frac{4}{30} = 0.12$$

Коэффициентом вынужденного простоя аппаратуры k_n называют отношение времени вынужденных простоев t_n к сумме времени исправной работы $t_{и.р}$ и времени вынужденных простоев в течение одного и того же календарного срока, т. е.

$$k_n = \frac{t_n}{t_{и.р} + t_n} \quad (2.10)$$

Коэффициентом готовности аппаратуры k_r называется отношение времени исправной работы к сумме времени исправной работы и времени вынужденных простоев в течение одного и того же календарного срока

$$k_r = \frac{t_{и.р}}{t_{и.р} + t_n} \quad (2.11)$$

Сумма коэффициента вынужденного простоя и коэффициента готовности

$$k_n + k_r = 1, \quad (2.12)$$

откуда

$$k_r = 1 - k_n \quad (2.13)$$

Коэффициентом стоимости эксплуатации называют отношение стоимости эксплуатации аппаратуры в течение одного года к стоимости ее изготовления.

Данная характеристика надежности может быть использована при технико-экономических расчетах.

2.2. Интенсивность отказов элементов и меры по ее уменьшению

Аппаратура выходит из строя из-за недостаточной надежности элементов, ошибок при проектировании и производстве, а также в результате неправильной эксплуатации. В большинстве случаев отказ аппаратуры происходит вследствие случайного или закономерного отказа одного из входящих в нее элементов. Следовательно, задача обеспечения надежности аппаратуры главным образом сводится к обеспечению безотказной работы ее элементов.

Наиболее удобной количественной характеристикой надежности элементов является интенсивность отказов $\lambda(t)$. Учитывая, что большую часть своего срока службы аппарата работает с элементами, находящимися на этапе нормальной работы, будем считать интенсивность отказов элементов данного типа постоянной, т. е.

$$\lambda(t) = const.$$

Интенсивность отказов элементов отличаются между собой в сотни и тысячи раз. Так, например, интенсивность отказов сопротивлений редко превышает $0,015 \cdot 10^{-3}$ 1/час, интенсивность отказов реле достигает $1 \cdot 10^{-3}$ 1/час. Из этого следует, что сопротивление как элементы гораздо более надежнее, чем реле. Значит, на надежность

аппаратуры влияет не сама по себе опасность отказов элементов, а групповая опасность, которая представляет собой произведение числа элементов на их опасность отказов $n\lambda$.

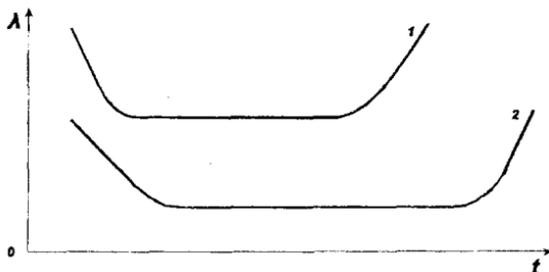


Рис. 2.1. Зависимость опасности отказов от времени.

1 — элементы работают в нормальном режиме; 2 — элементы работают в разгруженном режиме или облегченных условиях эксплуатации

Интенсивность отказов элементов определяется в первую очередь качеством их конструирования и изготовления. Однако даже хорошо сконструированные и изготовленные элементы могут стать причиной многочисленных неисправностей, если их применять в режимах и условиях эксплуатации, на которые они не рассчитаны.

Это значит, что ни в коем случае не следует превышать оговоренные техническими условиями предельно допустимые значения токов, напряжений, рассеиваемых мощностей, а также выходить за пределы предусмотренных условий эксплуатации (интервалы рабочих температур и давлений, максимальное значение влажности, вибрации и т. д.).

Облегчение режимов работы и условий эксплуатации может существенно снизить интенсивность отказов элементов.

На рис. 2.1 показаны кривые, отображающие зависимость интенсивности отказов от времени, в случае использования элементов в номинальном и разгруженном режимах или облегченных условиях эксплуатации. В разгруженном режиме или облегченных условиях эксплуатации интенсивность отказов имеет меньшее значение. Хотя при этом несколько увеличивается продолжительность этапа приработки, зато более продолжительным становится период нормальной работы и износ наступает гораздо позже.

Однако разгрузка элементов часто ведет к увеличению габаритов и веса аппаратуры, а условия эксплуатации определяются тактическим назначением аппаратуры и разработчик не всегда может на них влиять.

Режим, в котором используется тот или иной элемент, принято характеризовать коэффициентом нагрузки k_H .

Условимся коэффициентом нагрузки называть отношение силы тока, напряжения или рассеиваемой мощности к соответствующему для элемента данного типа предельно допустимому (номинальному) значению. При этом критерием степени нагрузки следует считать ту электрическую величину, которая практически оказы-

вают решающее влияние на работоспособность элементов данного типа. Такой величиной для сопротивления является рассеиваемая мощность, для конденсаторов - приложенное напряжение и т. д. Для сопротивлений коэффициент нагрузки

$$k_{\text{ир}} = \frac{P_R}{P_{R_{\text{доп}}}} \quad (2.14)$$

для конденсаторов

$$k_{\text{ис}} = \frac{U_c}{U_{c_{\text{доп}}}} \quad (2.15)$$

для полупроводниковых приборов

$$k_{\text{н}} = \frac{I_p}{I_{\text{доп}}} \quad (2.16)$$

Бывают случаи, когда коэффициент нагрузки следует оценивать другими электрическими величинами.

На интенсивность отказов элементов, кроме режимов их работы влияет окружающая температура внутри блока, зависящая от температуры окружающей среды, и количества тепла, выделяемого нагревающимися элементами схемы, а также другие воздействующие факторы (вибрации, удары и т. п.).

Для снижения окружающей температуры, а значит, для уменьшения интенсивности отказов всех деталей необходимо отводить тепло, выделяемое нагревающимися элементами.

Передача тепла нагретыми элементами в окружающее пространство происходит тремя путями - тепловым излучением, за счет конвекции и за счет теплопроводности.

Передача тепла излучением осуществляется тепловыми лучами, находящимися в инфракрасной области спектра. Количество тепла в ваттах, отдаваемого в одну секунду нагретым телом за счет лучеиспускания, определяются по формуле

$$P_{\text{л}} = cS \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right], \quad (2.17)$$

где S - поверхность излучения, м^2 , c - коэффициент лучеиспускания; T_1 - абсолютная температура тела, излучающего тепло, град.; T_2 - абсолютная температура тела, воспринимающего тепло, град.

Охлаждение элементов электронной аппаратуры за счет теплового излучения нельзя считать основным способом передачи тепла из-за небольших поверхностей и малых разностей температур. Однако применение, например, матовой черной окраски существенно повышает тепловое излучение за счет большого коэффициента лучеиспускания.

Передача тепла при помощи конвекции. Конвекция - это передача тепла от более нагретых к менее нагретым участкам жидкости или газа. Тепло от нагретого тела передается частицам жидкости или газа, которые приходят в движение и передают тепловую энергию менее нагретым участкам за счет разницы в плотностях более и менее нагретых пространств.

Количество тепла в ваттах, отдаваемого в одну секунду нагретым телом за счет конвекции, определяется по формуле

$$P_k = h_c \Delta t S, \quad (2.18)$$

где h_c - коэффициент конвекции;

Δt - разность температур нагретой поверхности и охлаждающей среды, S - охлаждаемая поверхность, $см^2$. Коэффициент конвекции зависит от формы охлаждаемой поверхности, ее расположения и физических параметров.

При охлаждении за счет конвекции кожуха прибора коэффициент конвекции

$$h_c = k_1 \sqrt[4]{\Delta t}, \quad (2.19)$$

При этом коэффициент k_1 для дна кожуха равен 1,24, а для стенок - 1,86; для верхней части - 2,48.

Большой эффект дает применение принудительного охлаждения, при котором вентилятор приводит в движение воздух, ускоряя таким образом процесс теплопередачи.

Теплопроводность. Передача тепла за счет теплопроводности осуществляется в результате взаимного соприкосновения частиц, при котором происходит отдача тепла менее нагретым частицам.

Количество тепла в ваттах, передаваемого в одну секунду за счет теплопроводности, определяется по формуле

$$P_T = \eta \frac{S \Delta t}{l} \quad (2.20)$$

где S - сечение, через которое проходит тепловой поток, $см^2$;

Δt - разность температур, $^{\circ}C$;

l - длина пути теплового потока, $см$;

η - коэффициент теплопроводности.

Высокую теплопроводность имеют серебро, медь, алюминий. Плохо проводят тепло асбест, стекло, бакелизированная бумага, еще хуже - вода и трансформаторное масло.

Из газов сравнительно низкой теплопроводностью обладает воздух. Гораздо лучше проводит тепло водород, поэтому он применяется для охлаждения приборов, выделяющих большое количество тепла.

В электронной аппаратуре для отвода тепла способом теплопроводности широко применяют различные платы и перемычки, изготовленные из хорошо проводящего тепло материала.

На величину интенсивности отказов элементов оказывают воздействие вибрационные и ударные нагрузки, которым подвергается аппаратура в процессе транспортировки и эксплуатации.

Вибрация представляет собой длительное переменное по направлению движение элементов конструкции, происходящее под воздействием внешних колебательных сил. В процессе вибрации возникает сила, которая может привести к обрывам проводов, ослаблению всевозможных соединений и т. п. В условиях продолжительной вибрации может появиться усталостное повреждение материалов деталей. Особую опасность представляет вибрация, происходящая на частоте, равной собственным частотам деталей, узлов и конструкций в целом.

Крайне неблагоприятно влияют на работу аппаратуры ускорения и удары. Ускорения, возникающие при ударах, приводят к деформациям, трещинам, обрывам и другим повреждениям, которые нередко полностью выводят аппаратуру из строя.

Для борьбы с влиянием ударных и вибрационных перегрузок применяют различные амортизаторы и др.

2.3. Условия применения и эксплуатации электроэлементов

Полупроводниковые диоды. Высокая надежность полупроводниковых диодов обеспечивается строгим соблюдением условий их применения.

Важнейшим из этих условий являются допустимые пределы температур окружающей среды, которые для различных типов диодов составляют:

для германиевых $-60\dots+70^{\circ}\text{C}$;

для кремниевых $-60\dots+125^{\circ}\text{C}$.

Большинство типов диодов можно использовать при атмосферном давлении от 5 мм рт. ст. до 2 атм и при 98% относительной влажности окружающего воздуха. Не следует располагать диоды вблизи нагреваемых элементов схем. Пайку производят на значительном расстоянии от корпуса диода.

Основные предельно допустимые эксплуатационные данные полупроводниковых диодов - наибольшие выпрямленный ток и амплитуда обратного напряжения. Оба эти параметра существенно зависят от температуры окружающей среды, поэтому в справочниках обычно приводятся данные для различных температур.

Если значения выпрямленного тока неизвестны, то для его определения при температуре t° можно пользоваться формулой

$$I = I_{\text{МАКС}} \sqrt{\frac{t_{\text{П.МАКС}}^{\circ} - t^{\circ}}{t_{\text{П.МАКС}}^{\circ} - t_{\text{кр}}^{\circ}}}, \quad (2.21)$$

где $I_{\text{макс}}$ - наибольшее значение выпрямленного тока (оно оговорено в справочнике для t°);

$t_{п.макс}$ - наибольшая температура перехода (указывается в справочнике);

t° - окружающая температура.

Амплитуда обратного напряжения (в целях повышения надежности) во всех случаях не должна превышать 70% от наибольшего значения, приведенного в справочнике в качестве предельно допустимого (для данной температуры окружающей среды).

Существенным недостатком всех полупроводниковых диодов является большой разброс прямого и обратного сопротивлений разных диодов одного и того же типа. Это затрудняет последовательное и параллельное соединение диодов, необходимое для увеличения предельно допустимых значений амплитуды обратного напряжения и наибольшего выпрямленного тока.

При последовательном соединении диодов обратное напряжение распределится не равномерно, а пропорционально обратным сопротивлениям диодов, что приведет, очевидно, к выходу из строя вследствие пробоя того из последовательно включенных диодов, который обладает наибольшим значением обратного сопротивления.

При параллельном соединении диодов протекающий ток распределится не равномерно, а обратно пропорционально прямым сопротивлениям диодов, что может привести к выходу из строя из-за перегрева слишком большим током того из параллельно включенных диодов, который обладает наименьшим значением прямого сопротивления.

При необходимости обеспечения приблизительно одинаковых условий работы последовательно и параллельно включенных диодов их подбирают по прямому и обратному сопротивлениям.

Такой подбор связан не только с производственными и эксплуатационными трудностями. Он недостаточен эффективен, так как температурные зависимости прямого и обратного сопротивлений различны для разных диодов.

Правильнее не подбирать, а подключать сопротивления - параллельно диодам при последовательном соединении и последовательно с диодами - при их параллельном соединении.

Рекомендуемые величины сопротивлений для последовательного и параллельно соединений диодов приводятся в справочниках.

Полупроводниковые транзисторы. Полупроводниковые транзисторы используются в диапазоне температур от -60 до $+120^{\circ}$ С в зависимости от типа транзистора, при 98% относительной влажности воздуха и атмосферном давлении от 5 мм рт. ст. до 2 атм. Основным недостатком полупроводниковых приборов является зависимость их параметров, в частности, предельно допустимых эксплуатационных данных, от температуры. При проверке режимов работы транзисторов и диодов необходим строгий учет температурных условий.

Проверке подлежат следующие предельно допустимые эксплуатационные данные полупроводниковых транзисторов.

1. Наибольшая мощность, рассеиваемая коллектором.

В справочниках обычно приводится значение наибольшей мощности $P_{макс}$ рассеиваемой коллектором при температуре $20 \pm 5^{\circ}$ С, и указывается, на сколько снижается эта мощность при повышении температуры на каждые 10° . Если таких данных нет, то

для определения наибольшей рассеиваемой мощности при некоторой температуре окружающей среды t_0° можно воспользоваться формулой

$$P = P_{\text{МАКС}} \frac{t_{\text{П.МАКС}} - t}{t_{\text{П.МАКС}} - 20}, \quad (2.22)$$

где $t_{\text{П.МАКС}}$ – наибольшая температура перехода.

2. Наибольшие напряжения коллектор - эмиттер, коллектор - база и эмиттер - база.

Наибольшие напряжения между электродами зависят от температуры. В справочниках приводятся наибольшие напряжения для температуры $20 \pm 5^\circ \text{C}$, а также указывается, с какой температуры и на сколько процентов снижаются соответствующие напряжения на каждые 10°C .

3. Наибольшие значения токов коллектора и эмиттера.

Температура перехода в режиме насыщения существенно зависит от тока эмиттера. С появлением на эмиттере смещения, близкого к коллекторному напряжению, ток эмиттера даже может превышать ток коллектора. Наибольшие значения токов приводятся в справочниках для различных температур.

В целях повышения надежности схем с полупроводниковыми приборами нельзя располагать их вблизи нагревающихся элементов схемы; производить пайку и изгиб выводов на меньшем, чем указано в справочнике, расстоянии от корпуса триода; при наличии напряжений на электродах допускать отключения цепи базы в схемах с общим эмиттером или цепи эмиттера в схемах с общей базой.

На надежность полупроводниковых приборов, помимо чисто механических причин (облом выводов, трещины на пластинках полупроводников, нарушение герметичности и др.), влияют дрейфы их электрических параметров с течением времени. Дрейфы параметров бывают трех видов:

а) дрейф обратного тока, представляющий собой медленное изменение тока коллектора;

б) токовый дрейф, заключающийся в изменении усилительных свойств транзистора после импульса тока эмиттера;

в) температурный дрейф, который проявляется в медленном изменении усилительных свойств транзистора, подвергающегося температурному воздействию.

Эти изменения вызываются попаданием влаги и других примесей на поверхность электронно-дырочного перехода и могут быть сведены к минимуму лишь при такой обработке перехода, которая обеспечила бы полное удаление всех примесей.

Условия применения и эксплуатации сопротивлений и конденсаторов. Сопротивления и конденсаторы – наиболее массовые элементы электронной аппаратуры. Снижение интенсивности их отказов даже на небольшую величину существенно влияет на повышение надежности электронных схем. Поэтому необходимо особенно тщательно анализировать режимы и условия, в которых они работают, не допускать превышения предельно допустимых значений мощностей, напряжений и токов, а также использовать сопротивления и конденсаторы в условиях, на которые они рассчитаны.

ГОСТ и ТУ определяют пределы рабочих температур, максимальное значение относительной влажности воздуха, минимальную величину атмосферного давления и допустимую вибрацию.

Кратко рассмотрим предельно допустимые эксплуатационные данные для сопротивлений.

– номинальное значение рассеиваемой мощности.

Номинальное значение рассеиваемой мощности - это наибольшая мощность, которая может быть допущена к рассеиванию на данном сопротивлении. Величина номинальной рассеиваемой мощности зависит от температуры окружающей среды и от режима работы сопротивления.

Предельно допустимое рабочее напряжение.

Предельно допустимое рабочее напряжение зависит от характера напряжения (постоянное, переменное или импульсное).

Для конденсаторов предельно допустимыми эксплуатационными данными являются:

– номинальное рабочее напряжение постоянного тока.

– наибольшая амплитуда напряжения переменного тока. Данная величина обычно приводится для различных частот.

Если конденсаторы предназначены также для работы в цепях пульсирующего тока, указывается, в каком предельно допустимом соотношении могут находиться амплитуда напряжения переменного тока и величина рабочего напряжения постоянного тока. Наибольшее значение реактивной мощности:

$$P_r = U^2 \omega C, \quad (2.23)$$

где U - эффективное значение напряжения переменной составляющей; ω - частота;

C - емкость.

При данных частоте и емкости реактивная мощность определяется величиной напряжения.

Рассмотрим условия применения некоторых типов сопротивлений и конденсаторов.

Постоянные углеродистые сопротивления выпускаются на номинальные рассеиваемые мощности от 0,25 до 10 *вт*. Они предназначены для работы в цепях постоянного, переменного синусоидального и импульсного напряжений при температуре окружающего воздуха от - 60 до +100° С, относительной влажности воздуха не более 98%, атмосферном давлении не менее 90 мм рт. ст., в условиях вибрации, создающей ускорение не более 6 *g*.

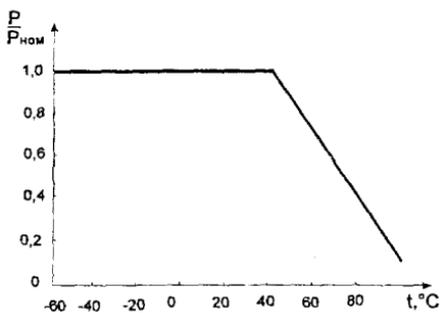


Рис. 2.2. Зависимость предельно допустимой нагрузки сопротивлений типа ВС от температуры окружающей среды

Номинальное значение рассеиваемой мощности может приниматься в качестве предельно допустимого лишь для постоянного и синусоидального напряжений в интервале температур окружающего воздуха от -40 до $+60^\circ\text{C}$. При температуре выше 40°C предельно допустимое значение рассеиваемой мощности резко снижается, составляя при 100° лишь 15% от номинального. Для определения допустимой нагрузки на сопротивление (в процентах от номинальной) в зависимости от температуры окружающей среды следует пользоваться графиком рис. 2.3.

Средняя допустимая электрическая нагрузка при действии импульсного напряжения снижается вдвое.

Сопротивления постоянные непроволочные типа МЛТ (металлизированные лакированные теплостойкие) выпускаются на номинальные рассеиваемые мощности от 0,5 до 2 Вт и предназначены для работы в условиях непрерывной и импульсной нагрузки в интервале температур от -60 до $+120^\circ\text{C}$, при относительной влажности воздуха до 98%, давлении воздуха от 780 до 40 мм рт. ст. и вибрации, создающей ускорение до 15 g.

Средняя мощность, рассеиваемая сопротивлением в импульсном режиме при температуре окружающего воздуха 70°C и атмосферном давлении 760 мм рт. ст., не должна превышать 10% от номинальной.

Если сопротивление длительно работает при температуре свыше 70°C и атмосферном давлении до 40 мм рт. ст., величина рассеиваемой мощности не должна превышать 60% от номинальной.

Сопротивления переменные (потенциометры) типа СП (композиционные) предназначены для работы в цепях постоянного и переменного тока.

Согласно ГОСТ по условиям применения все потенциометры делятся на три группы (III, IV и V).

Например потенциометры III группы предназначены для использования в интервале температур от -65 до $+125^\circ\text{C}$, в условиях относительной влажности до 98% при 40°C и атмосферном давлении от 0,05 до 780 мм рт. ст.

Потенциометры IV группы применяются при температуре от - 65 до +100°С, относительной влажности до 98% при 40° С и давлении 5-780 мм рт. ст. Потенциометры обеих групп могут работать в условиях вибрации при ускорении до 10 g и частоте от 5 до 1000 гц.

Потенциометры V группы рассчитаны на менее тяжелые условия эксплуатации: интервалы температуры окружающей среды от - 40 до +70° С, относительная влажность до 85% при 25° С, атмосферное давление от 720 до 780 мм рт. ст.

Номинальные значения рассеиваемых мощностей потенциометров типа СП (Вт):

III и IV групп	2
III, IV и V групп	1
V группы	0,5 и 0,25

являются предельно допустимыми лишь при температуре окружающей среды не выше 20° С. При более высоких температурах и давлении 720-780 мм рт. ст. определить номинальное значение можно по графику рис. 2.3.

ГОСТ ограничивает длительность непрерывной эксплуатации потенциометров СП (табл. 2.2).

Таблица 2.2

Максимальное время непрерывной эксплуатации потенциометров

Номинальная мощность, рассеиваемая сопротивлением, Вт	Максимальное время непрерывной эксплуатации (час)			
	при мощности рассеяния			
	2,0 Вт	1,0 Вт	0,5 Вт	0,25 Вт
2,0; 1,0 0,5; 0,25			более	более
	500	5000	5000	5000
	-	500	5000	» 5000
	-	-	500	» 5000
	-	-	-	500

При температуре свыше 20°С для определения допустимой длительности непрерывной работы следует пользоваться графиком рис. 2.3.

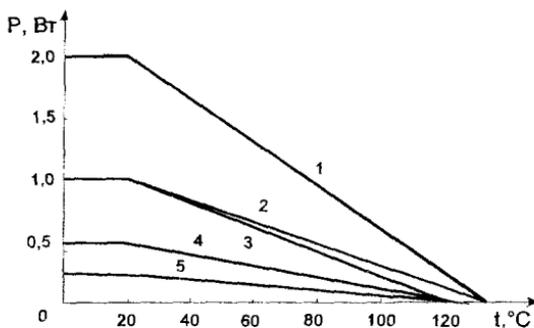


Рис. 2.3. Зависимость предельно допустимой мощности, рассеиваемой на потенциометрах типа СП от температуры окружающей воздуха

- 1 – для потенциометров на 2 Вт, 2 – для потенциометров на 1Вт групп III и IV;
 3 – для потенциометров на 1 Вт группы V; 4 – для потенциометров на 0,5 Вт;
 5 – для потенциометров на 0,25 Вт

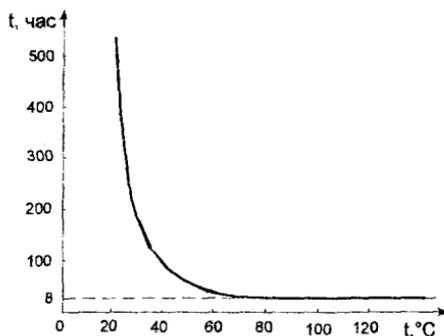


Рис. 2.4. Зависимость допустимой длительности непрерывной работы потенциометров СП от температуры окружающей воздуха

Конденсаторы должны нормально работать в цепях, где на постоянное напряжение накладывается напряжение переменного тока, однако при этом сумма постоянного и амплитуды переменного напряжений не должна превышать номинальной величины рабочего напряжения.

Конденсаторы бумажные герметизированные типа КБГ на напряжения до 1500в могут быть использованы в интервале температур от -60 до $+70^\circ\text{C}$, при относительной влажности воздуха до 98%, вибрации с ускорением до 9 g и при ударах с ускоре-

нием 4 г. Конденсаторы на рабочие напряжения до 400 в могут работать при понижении атмосферного давления до 5 мм рт. ст., а конденсаторы на более высокие напряжения при атмосферном давлении не ниже 41 мм рт. ст.

При работе конденсаторов в цепи переменного тока (постоянное напряжение отсутствует) допустимое рабочее напряжение снижается.

Так, например, конденсатор на номинальное рабочее напряжение 600 в емкостью свыше 4 мкф может быть использован в цепи переменного тока, если эффективное значение переменного напряжения на нем не превышает 100 в.

В цепи пульсирующего тока отношение амплитуды напряжения переменного тока к постоянному напряжению не должно превышать при частоте, см. табл. 2.3

Таблица 2.3

Отношение амплитуды напряжения к постоянному напряжению

Амплитуда напряжения при частоте, Гц	%
50	20
100	15
400	8
1 000	5
10 000	2

Сумма амплитуды переменной составляющей и постоянного напряжения не должна превышать номинального рабочего напряжения. В импульсном режиме могут быть использованы конденсаторы емкостью до 1 мкф при частоте следования импульсов не выше 1000 гц и токе в импульсе - не более 50 а. Допустимое импульсное напряжение снижается по сравнению с номинальным постоянным напряжением в соответствии с данными табл. 2.3, имеющейся в ГОСТ. Например, конденсаторы емкостью от 0,1 до 1 мкф на номинальное напряжение 1500 в применяются в импульсной цепи при импульсном напряжении не выше 300 в.

Конденсаторы герметические керамические типа КГК рассчитаны на использование при рабочем напряжении высокой частоты до 250 в и напряжении постоянного тока до 500 в.

Конденсаторы могут работать в интервале температур от - 60 до +80° С, при относительной влажности воздуха до 98%, атмосферном давлении не ниже 40 мм рт. ст. и в условиях вибрации с ускорением до 9 г.

Конденсаторы слюдяные герметические малогабаритные типа СГМ могут применяться:

а) в интервале температур от - 60 до + 80° С при относительной влажности воздуха до 98%;

б) при атмосферном давлении не ниже 5 мм рт. ст. для конденсаторов на номинальное рабочее напряжение до 500 в и не ниже 40 мм рт. ст. - для конденсаторов на номинальное рабочее напряжение свыше 500 в;

в) при вибрации, создающей ускорение до 10 g. Конденсаторы типа СГМ работают при постоянном и переменном напряжении, допускаясь и импульсный режим работы.

Номинальное рабочее напряжение постоянного тока для различных видов конденсаторов составляет 250, 500, 550, 1000 и 1500 в.

При работе в цепях переменного тока амплитуда напряжения не должна превышать при частоте, см. табл. 2.4

Таблица 2.4

Амплитуда напряжения

Амплитуда напряжения при частоте, Гц	в
до 500	250
500-10 000	150
свыше 10 000	50

Указанные значения амплитуд переменного напряжения допускаются лишь при условии, что реактивная мощность не превышает допустимой величины.

Если конденсаторы работают в цепях пульсирующего тока, сумма постоянного и амплитуды переменного напряжений не должна превышать величины номинального рабочего напряжения.

Конденсаторы электролитические типа КЭ выпускаются на рабочие напряжения от 8 до 500 в и работают при постоянном или пульсирующем напряжении. По интервалу рабочих температур они делятся на четыре группы:

ОМ (особоморозостойкие) от -60 до +60°C

ПМ (с повышенной морозостойкостью) -50...+60°C

М (морозостойкие) -40...+60°C

11 (неморозостойкие) -10...+60°C

Электролитические конденсаторы используют в условиях относительной влажности воздуха до 80% и при вибрации, создающей ускорение до 4 g.

При работе в цепях пульсирующего тока амплитуда переменной составляющей не должна превышать значения, предусмотренного ГОСТ для конденсатора данного вида.

Сумма напряжения постоянного и амплитуды напряжения переменного токов не должна превышать величину номинального рабочего напряжения.

2.4. Проверка режимов сопротивлений и конденсаторов на предельно допустимые эксплуатационные данные

Проверка мощности, рассеиваемой на сопротивлениях. Если через сопротивление протекает постоянный ток I_0 , то рассеиваемая на нем мощность определяется по формуле:

$$P_R = \frac{U_0^2}{R} = I^2 R, \quad (2.24)$$

где U_0 - падение напряжения на сопротивлении (известно из расчета либо измерено вольтметром); R - величина сопротивления.

Если через сопротивление протекает переменный ток синусоидальной формы, то рассеиваемая на нем мощность определяется по формуле

$$P_R = \frac{U^2}{R} = I^2 R, \quad (2.25)$$

где U и I - эффективные значения напряжения и тока.

В общем случае через сопротивление протекает ток не только синусоидальной, но и несинусоидальной формы, причем он может содержать и постоянную составляющую. Выделяющееся при этом напряжение имеет такой же характер рис. 2.5.

В этом случае, рассеиваемая на сопротивлении мощность также определяется через эффективные значения напряжения или тока, т. е. по формуле (2.24), однако определение этих значений затруднено.

Эффективное значение несинусоидального напряжения (или тока) можно найти извлекая квадратный корень из суммы квадратов постоянной составляющей U_0 и эффективных значений гармонических составляющих U_1, U_2, U_3 и т. д., входящих в состав напряжения данной формы

$$U = \sqrt{U_0^2 + U_1^2 + U_2^2 + U_3^2 + \dots} \quad (2.26)$$

Если напряжение состоит из постоянной и синусоидальной составляющих рис. 2.6, то в приведенной формуле остаются первые два члена и эффективное значение напряжения определяется как корень квадратный из суммы квадрата постоянной составляющей U_0 и квадрата эффективного значения синусоидальной составляющей U_1

$$U = \sqrt{U_0^2 + U_1^2} \quad (2.27)$$

Если кривая напряжения носит несинусоидальный характер, то для определения U_1, U_2, U_3 и т. д. потребуется разложить ее на гармонические составляющие, что весьма кропотливо.

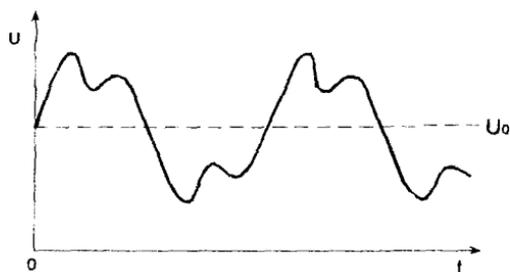


Рис. 2.5. График напряжения несинусоидальной формы

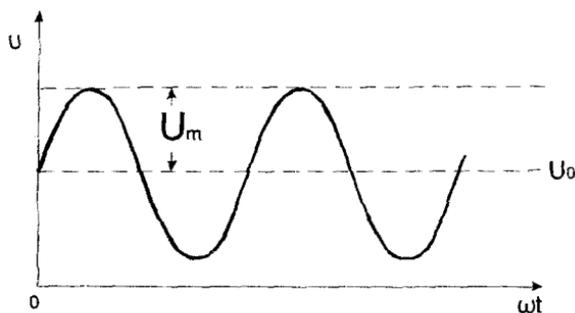


Рис. 2.6. График напряжения, состоящего из синусоидальной и постоянной составляющих

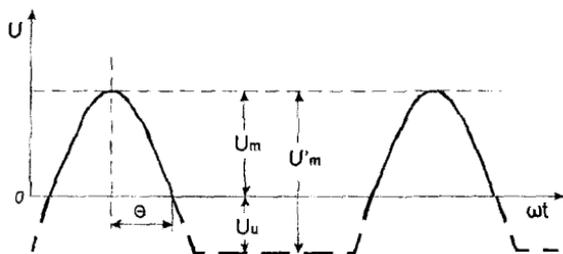


Рис. 2.7. График напряжения усеченной синусоиды

Поэтому практически (когда напряжение может быть выражено при помощи элементарных функций) используют формулу, определяющую эффективное значение напряжения

$$U = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} u^2 d\omega t} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2 dt}, \quad (2.28)$$

где U - эффективное значение напряжения любой формы; u - мгновенное значение того же напряжения; ω - частота; T - период колебаний.

Подставив в формулу (2.28) $u = U_m \sin \omega t$, получим эффективное значение синусоидального напряжения

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \quad (2.29)$$

При несинусоидальном напряжении надо также подставить зависимость мгновенного значения напряжения от времени в формулу (2.28) и произвести интегрирование.

Если проверку режимов сопротивлений производят непосредственно на готовом образце, то необходимо измерить эффективное значение напряжения (тока) приборами тепловой, термоэлектрической или электростатической систем, которые, как известно, реагируют на эффективные значения напряжений (токов) любой формы. Если приборы указанных систем не могут быть использованы, применяют осциллограф и вольтметр магнитоэлектрической системы, с помощью которых замеряют амплитуду импульсов и постоянную составляющую напряжения, а затем производят расчет.

ГЛАВА 3. Расчет показателей надежности ЭиВС

3.1. Краткие сведения из теории надежности

Все количественные характеристики надежности элементов и систем носят вероятностный характер. Это означает, что та или иная характеристика надежности справедлива по отношению к большому числу образцов, либо к одному образцу, но при условии, что наблюдение за ним происходит достаточно долго, т.е. произошло большое число отказов.

Пусть, например, опасность отказов элементов некоторого типа составляет 0,5 1/час. Это не означает что при 5-ти, 10-ти или 15-ти элементах данного типа каждый час будет выходить из строя половина из среднего числа элементов, продолжающих работать исправно. Если поставить на испытания несколько тысяч или десятков тысяч элементов, то интенсивность отказов данных элементов действительно окажется близкой к 0,5. Причем, чем больше испытывается элементов, тем более достоверным окажется результат определения интенсивности отказов.

Аналогично можно разъяснить вероятностный характер среднего времени безотказной работы T_{cp} и среднего времени безотказной работы между двумя соседними отказами t_{cp} . Допустим, что некоторые изделия имеют $T_{cp} = 100$ час.

Значение $T_{cp} = 100$ час. будет получено лишь при испытаниях большого числа образцов, а величина t_{cp} приблизится к указанному значению среднего времени между двумя отказами только при длительных испытаниях, когда может наблюдаться большое число отказов на каждом образце.

Что касается такой характеристики, как вероятность безотказной работы $P(t)$, само название указывает на ее вероятностный характер. Допустим, что некоторые системы имеют вероятность безотказной работы за 1000 час, равную 0,95. Нельзя быть уверенным в том, что данный конкретный образец из числа этих систем проработает все 1000 час. Однако если взять 100 таких образцов, то можно утверждать, что примерно 95 из них проработают 1000 час., а остальные выйдут из строя.

Вероятностный характер рассмотренных характеристик надежности обусловлен тем, что отказы являются событиями случайными (имеется в виду, что износ элементов и систем еще не наступил). На этапе износа, когда отказы носят не случайный, а закономерный характер, в некоторых случаях можно предсказать выход из строя данного конкретного элемента. Однако большую часть своего срока службы аппаратура работает на этапе нормальной работы, когда происходят случайные отказы и характеристики надежности являются вероятностными.

Теория надежности дает математические методы для определения закономерностей, которым подчиняются случайные явления, что позволяет вычислять характеристики надежности и устанавливать имеющуюся между ними связь.

Остановимся кратко на основах теории вероятностей. Явления и события, которые происходят в природе, можно разделить на три группы.

Первая группа - *достоверные* события. Достоверное событие обязательно произойдет, если будут выполнены вполне определенные условия. Например, если в ящик положить 5 шаров черных, то мы вытащим из ящика черный шар. Это событие имеет одну или несколько известных причин.

Вторая группа (противоположная) - *невозможные* события, т. е. такие, которые при определенных и известных условиях произойти не могут, так как отсутствуют причины для их возникновения. Так, невозможно вытащить из ящика, в котором находятся черные шары шар другого цвета.

Третья группа - *случайные* события. Неизвестно, когда они произойдут и произойдут ли вообще в интересующий нас отрезок времени. Случайное событие может произойти, а может и не произойти, поэтому его нельзя отнести ни к достоверным, ни к невозможным. Бросим, например, игральную кость. Нельзя заранее сказать, сколько выпадает очков, это число будет случайным. Точно так же неизвестно, проработает ли прибор безотказно в течение гарантийного срока службы.

Все случайные события не являются беспричинными. Они имеют множество причин, но нельзя предсказать, возникнет ли такая их совокупность, которая приведет к данному явлению. Изучая причины случайных явлений и их очень сложную взаимную связь, предсказывают наводнения, погоду и т. д. И чем глубже постигаются эти причины, тем меньше будет ошибок в предсказаниях.

Причины, приводящие к тем или иным явлениям, изучаются физикой, химией, метеорологией и другими естественными науками. Наука о надежности занимается, в частности, изучением причин отказов электронной аппаратуры, приборов и т. д. и разработкой мероприятий, которые ведут к снижению числа отказов.

Было установлено, что случайные события, т. е. такие, которые повторяются при многократных испытаниях, подчиняются определенным закономерностям, и теория вероятностей, являясь разделом математики, устанавливает эти закономерности.

При одном бросании монеты нельзя предсказать, какой стороной она упадет, так как не установлена совокупность причин, которые на это влияют. Если монету бросать многократно, она будет падать гербом вверх приблизительно в 50% случаев. Чем больше предпринять бросаний, тем ближе это число к 50%. По статистическим данным известно, было предпринято 12 000 бросаний. При этом герб выпал в 50,16% случаев. В другой раз было произведено 24 000 бросаний и герб выпал в 50,05% случаев.

Вероятностью наступления некоторого события A называется предел отношения числа случаев появления данного события M к общему числу случаев N при $N \rightarrow \infty$.

Различают математическую и статистическую вероятности. *Математическая вероятность* определяется из расчета, *статистическая* - из опыта.

В примере с монетой математическая вероятность выпадения герба

$$P_A = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{M}{N} = 0,5, \quad (3.1)$$

где M - число случаев падения монеты гербом вверх; N - число бросаний.

Статистическая вероятность выпадения герба

$$r_A = \frac{m}{n} = 0,5016 \text{ (при 12000 бросаний);}$$

$$r_A = \frac{m}{n} = 0,5005 \text{ (при 24000 бросаний).}$$
(3.2)

где m и n соответственно означают то же, что M и N , однако их значения получены из опытов.

Вероятность находится в пределах от 0 до 1. Вероятность невозможного события равна нулю. Вероятность достоверного события равна единице.

Допустим, надо достать шары из корзины. Если в корзине имеются только белые шары, то вероятность появления цветного шара равняется нулю, ибо это событие невозможное, а вероятность появления белого шара, как события достоверного, равняется единице.

Если же в корзине, из имеющихся там 10 шаров, 6 белых и 4 цветных, то появление шара того или иного цвета будет событием случайным. Вероятность появления цветного шара

$$P_{\text{цв}} = \frac{4}{10} = 0,4$$

вероятность появления белого шара

$$P_{\text{бел}} = \frac{6}{10} = 0,6$$

При многократном повторении этого опыта 40% вытащенных шаров были бы цветными, а 60% - белыми. В то же время при выполнении одного такого опыта следует больше рассчитывать на появление белого шара, чем цветного.

Теорема сложения вероятностей. Прежде чем сформулировать теорему, дадим определение **несовместимых** событий.

Несовместимыми называются такие события, одно из которых исключает все другие, т. е. одновременное появление их в данном опыте невозможно.

Например, при бросании монеты падение ее гербом вверх исключает ее падение гербом вниз, т. е. это события несовместимые. Если из корзины, в которой имеются белые и красные шары, достают по одному шару, то появление белого и красного шара - события несовместимые, ибо одновременное появление красного и белого шаров невозможно. Если же опыт будет заключаться в доставании не одного, а двух шаров, то одновременное появление красного и белого шаров возможно и эти события нельзя считать несовместимыми.

Теорема сложения вероятностей формулируется следующим образом.

Если в некотором испытании могут иметь место несколько несовместимых, т.е. исключających друг друга, событий, то вероятность наступления одного из них равняется сумме вероятностей этих событий.

На основании этой теоремы для n событий можно написать

$$P \text{ (или } A_1, \text{ или } A_2, \dots, \text{ или } A_n) = P_{A_1} + P_{A_2} + \dots + P_{A_n}. \quad (3.3)$$

Для доказательства предположим, что имеется m случаев, когда могут наступать рассматриваемые несовместимые события A_1, A_2, \dots, A_n . В числе этих m случаев, в каждом из которых наступает одно из рассматриваемых несовместимых событий A_1, A_2 или A_n , событие A_1 наступает k_1 раз, событие A_2 - k_2 раз, событие A_n - k_n раз.

Следовательно, вероятность наступления события A_1 составляет

$$P_{A_1} = \frac{k_1}{m} \quad (3.4)$$

вероятность наступления события A_2

$$P_{A_2} = \frac{k_2}{m} \quad (3.5)$$

вероятность наступления события A_n

$$P_{A_n} = \frac{k_n}{m} \quad (3.6)$$

Вероятность того, что наступит одно из событий (A_1 , или A_2 или A_n)

$$P(\text{или } A_1, \text{ или } A_2, \dots, \text{ или } A_n) = \frac{k_1 + k_2 + \dots + k_n}{m} \quad (3.7)$$

Полученные значения вероятностей подставим в равенство (3.3)

$$\frac{k_1 + k_2 + \dots + k_n}{m} = \frac{k_1}{m} + \frac{k_2}{m} + \dots + \frac{k_n}{m} \quad (3.8)$$

Это тождество свидетельствует о справедливости равенства (3.3) и является доказательством теоремы сложения вероятностей.

Например, в корзине имеются 20 шаров, из которых 5 синих, 4 зеленых, 1 красный и 10 белых. Требуется определить вероятность появления цветного шара. Появления очередных шаров являются событиями несовместимыми, ибо одновременно может появиться только один шар. Следовательно, в данном случае возможно применить теорему сложения вероятностей.

Вероятность появления синего шара

$$P_{\text{син}} = \frac{5}{20} = \frac{1}{4};$$

вероятность появления зеленого шара

$$P_{\text{зел}} = \frac{4}{20} = \frac{1}{5};$$

вероятность появления красного шара

$$P_{\text{кр}} = \frac{1}{20}.$$

На основании теоремы сложения вероятностей можно написать P (или синего, или зеленого, или красного) $= P_{\text{син}} + P_{\text{зел}} + P_{\text{кр}} = \frac{1}{4} + \frac{1}{5} + \frac{1}{20} = \frac{5+4+1}{20} = \frac{10}{20} = 0,5$

Этого результата следовало ожидать, так как половина всех шаров - белые.

Если в данном опыте обязательно должно произойти одно из нескольких событий, то такие события называются *единственно возможными*.

Появление синего, зеленого или красного шара нельзя считать событием единственно возможным, так как может появиться еще и белый шар. События же, заключающиеся в появлении синего, зеленого, красного или белого шара, следует считать единственно возможными, так как других шаров в корзине нет.

Вероятность наступления одного из нескольких несовместимых и единственно возможных событий равняется 1, т. е., если A_1, A_2, \dots, A_n - события несовместимые и единственно возможные, то P (или A_1 , или A_2, \dots , или A_n) = 1.

Следовательно, сумма вероятностей таких событий равна 1.

Действительно, если в корзине имеются 5 синих, 4 зеленых, 1 красный и 10 белых шаров, то вероятность появления синего, зеленого, красного или белого шара

$$P \text{ (или синего, или зеленого, или красного, или белого)} = \\ = P_{\text{син}} + P_{\text{зел}} + P_{\text{кр}} + P_{\text{бел}} = \frac{5}{20} + \frac{4}{20} + \frac{1}{20} + \frac{10}{20} = \frac{5+4+1+10}{20} = 1$$

Если могут произойти только два единственно возможных и несовместимых события, то такие события называются *противоположными*. Если основное событие - A , то противоположное обозначают \bar{A} .

Сумма вероятностей единственно возможных и несовместимых событий равна 1, но противоположные события также являются несовместимыми и единственно возможными. Следовательно,

$$P_A + P_{\bar{A}} = 1; \quad (3.9)$$

$$P_{\bar{A}} = 1 - P_A. \quad (3.10)$$

Теорема умножения вероятностей. Прежде чем сформулировать теорему, дадим определение сложного события. *Сложным* называется событие, которое состоит в совпадении нескольких простых событий. *Простые* события, составляющие сложное событие, подразделяются на *независимые* и *зависимые*. *Независимыми* называются такие простые события, вероятность каждого из которых не зависит от того, произошли другие простые события или нет. *Зависимыми* называют такие простые события, вероятность каждого из которых зависит от того, произошли другие события, составляющие с ним сложное, или нет.

Теорема умножения вероятностей формулируется следующим образом.

Вероятность сложного события, заключающегося в совместном наступлении нескольких простых независимых событий, равна произведению вероятностей этих событий, т. е.

$$P(A_1, \text{ и } A_2, \text{ и } A_3, \dots, \text{ и } A_n) = P_{A_1} \cdot P_{A_2} \cdot P_{A_3} \cdot \dots \cdot P_{A_n}$$

Докажем теорему для числа событий $n = 2$.

Итак, имеем два события A_1 и A_2 . Пусть наступлению события A_1 благоприятствуют k_1 случаев из m_1 возможных, а наступлению события A_2 благоприятствуют k_2 случаев из m_2 возможных. Следовательно,

$$P_{A_1} = \frac{k_1}{m_1}, \quad P_{A_2} = \frac{k_2}{m_2} \quad (3.11)$$

Для совместного наступления событий A_1 и A_2 различными возможными случаями будут все комбинации каждого из возможных m_1 случаев события A_1 с каждым из m_2 случаев события A_2 , и общее число всех комбинаций составит произведение $m_1 m_2$.

Все случаи, благоприятствующие наступлению события A_1 и A_2 , представляют собой комбинацию каждого из k_1 случаев, благоприятствующих событию A_1 с каждым из k_2 случаев, благоприятствующих наступлению события A_2 , причем общее число комбинаций составит произведение $k_1 k_2$. Отсюда следует, что

$$P(A_1 \text{ и } A_2) = \frac{k_1 k_2}{m_1 m_2} = \frac{k_1}{m_1} \cdot \frac{k_2}{m_2} = P_{A_1} P_{A_2} \quad (3.12)$$

В случае трех простых событий, соединив любые два из них в одно сложное, можем написать

$$P(A_1 \text{ и } A_2, \text{ и } A_3) = P_{A_1} P_{A_2} P_{A_3} \quad (3.13)$$

Аналогично можно доказать, что теорема справедлива для любого числа простых событий.

Пример. Имеется электронный блок, входящий в систему. Вероятность исправной работы его в течение заданного времени составляет 0,9. Для повышения надежности устанавливают такой же резервный блок. Требуется найти, какой станет вероятность исправной работы блока с учетом резервного.

Электронный блок будет работать исправно, если:

- а) исправными являются и основной и резервный блоки - событие A ;
- б) основной блок исправен, а резервный неисправен - событие B ;
- в) резервный блок исправен, а основной вышел из строя - событие B .

Перечисленные события являются несовместимыми. Поэтому для нахождения вероятности того, что произойдет хотя бы одно из событий A , B или B , применяют теорему сложения вероятностей.

Вероятность исправной работы блока с учетом резервного будет равна

$$P_A + P_B + P_B$$

Вероятность того, что оба блока будут исправны, находят на основании теоремы умножения вероятностей независимых событий

$$P_A = 0,9 \cdot 0,9 = 0,81.$$

Вероятность того, что основной блок будет исправен, а резервный откажет

$$P_B = 0,9 \cdot 0,1 = 0,09,$$

где 0,1 - вероятность неисправной работы резервного блока. Точно так же

$$P_B = 0,09.$$

Таким образом, вероятность выполнения блоком своих функций благодаря резервному блоку возрастет с 0,9 до $0,81 + 0,09 + 0,09 = 0,99$.

3.2. Примеры расчета надежности

Приведем методику расчета характеристик надежности, рекомендованную в [8, 13, 15].

Согласно этой методике расчет надежности подразделяется на *ориентировочный* (предварительный) и *окончательный*.

Ориентировочный расчет обычно выполняется на этапе эскизного проектирования, когда производят анализ различных вариантов электрической схемы (с целью выбора наиболее оптимального). При выборе варианта наряду со всеми технико-экономическими показателями надо учитывать и надежность.

Окончательный расчет характеристик надежности производится тогда, когда имеется полностью разработанная схема и на основании расчетов или даже испытаний опытного образца известны режимы работы всех элементов, коэффициенты нагрузки и другие воздействующие факторы (климатические, механические и т.п.)

Исходными данными для ориентировочного расчета являются:

электрическая принципиальная схема изделия;

заданное время работы t_3 ;

условия эксплуатации и назначение работы изделия.

При ориентировочном расчете пользуются следующими допущениями:

- отказы элементов, случайные и независимые;
- для элементов справедлив экспоненциальный закон распределения надежности и отказы принимаются только внезапные, т.е. вероятность появления постепенных отказов равна единице;
- учитываются отказы электрической принципиальной схемы, а также монтажные соединения;
- учет электрического режима и условий эксплуатаций выполняются приближенно.

Последовательность ориентировочного расчета следующая.

1. На основании анализа электрической схемы формируют группы однотипных элементов по функциональному назначению. Монтажные соединения составляют отдельную группу; переходные отверстия и пайка также составляют группу.

2. Для элементов каждой группы по справочникам (ТУ, ГОСТам и т.п.) опреде-

ляют среднегрупповое значение интенсивности отказов.

3. Рассчитывают значение суммарной интенсивности отказов элементов по выражению:

$$\lambda_{\Sigma} = \sum_{j=1}^k \lambda_{0j} \cdot n_j, \quad (3.14)$$

где λ_{0j} – среднегрупповое значение интенсивности отказов элементов j -й группы, $j = 1, \dots, k$;

n_j – количество элементов в j -й группе;

k – количество сформированных групп однотипных элементов.

4. С использованием обобщенного эксплуатационного коэффициента определяя приближенный учет электрического режима и условий эксплуатации элементов.

Суммарную интенсивность отказов элементов определяют по выражению

$$\lambda_{\Sigma}(v) = \lambda_{\Sigma} \cdot k_{\Sigma} = k_{\Sigma} \cdot \sum_{j=1}^k \lambda_{0j} \cdot n_j, \quad (3.15)$$

где k_{Σ} – обобщенный эксплуатационный коэффициент, выбирают по статистическим таблицам в зависимости от условий эксплуатации.

Значение обобщенного эксплуатационного коэффициента k_{Σ} , приведено в таблице 3.1.

Таблица 3.1

Значение эксплуатационного коэффициента

Вид электронного средства, условия эксплуатации	Значения коэффициента k_{Σ}
Лабораторные условия	1,0
Помещение с регулируемой температурой и влажностью	1,1
Транспортируемые электронные средства	4...7
Наземные стационарные условия	2...4,7
Морские защищенные условия	7...12
Морские не защищенные условия	7...15
Бортовые (самолетные) условия	5...10

5. Определяют время наработки на отказ

$$T_0 = \frac{1}{\lambda_{\Sigma}(v)}, \quad (3.16)$$

Вероятность безотказной работы за заданное время t_3

$$P_{\Sigma}(t_3) = e^{-t_3 \lambda_{\Sigma}(v)} = e^{-\frac{t_3}{T_0}} \quad (3.17)$$

Среднее время безотказной работы устройства (средняя наработка до отказа)

$$T_{cp} = T_0 \quad (3.18)$$

Окончательный расчет показателей надежности проводится с учетом коэффициентов электрической нагрузки и условий работы элементов, выполняются на заключительных стадиях разработки изделий, когда выбраны типы и типоразмеры элементов, имеются результаты тепловых расчетов и др.

Расчет выполняется при тех же допущениях, что и ориентировочный, однако электрический режим и условия эксплуатации элементов учитываются более точно и учитываются элементы конструкций шасси, корпус, провода.

Последовательность расчета можно предложить следующей;

1. Определяют коэффициенты электрических нагрузок элементов изделия по выражению:

$$k_H = \frac{F_{раб}}{F_{ном}}, \quad (3.19)$$

где $F_{раб}$ – электрическая нагрузка элемента в рабочем режиме.

$F_{ном}$ – номинальная или предельная по ТУ электрическая нагрузка элемента.

2. Принимают решение о том, какие факторы, кроме коэффициентов k_H будут учтены для каждого элемента.

3. Формируются группы однотипных элементов, признаком являются не только примерное равенство k_H и параметров, описывающих другие учитываемые эксплуатационные факторы.

4. Определяются суммарная интенсивность отказов элементов с учетом k_H и условий их работы в составе изделия

$$\lambda_j(v) = \lambda_{0j} \cdot \prod_{i=1}^m \alpha(x_i), \quad (3.20)$$

$$\lambda_{\Sigma}(v) = \sum_{j=1}^k n_j \cdot \lambda_j(v), \quad (3.21)$$

где $\lambda_j(v)$ – интенсивность отказов элементов j-й группы с учетом k_H и условий эксплуатации

λ_{0j} – справочное значение интенсивности отказов элементов j-й группы, $j=1, \dots, k$.

n_j – количество элементов в j-й группе;

k – количество групп однотипных элементов, $\alpha(x_i)$ – поправочный коэффициент, учитывающий влияние фактора x_i , $i = 1 \dots m$.

5. По общепринятым формулам для экспоненциального распределения рассчитывают показатели T_0 , $P_{\Sigma}(t_3)$, T_{cp} .

6. При необходимости рассчитывают коэффициент готовности k_T и вероятность нормального функционирования $P_{н.ф.}(t_3)$.

$$k_r = \frac{T_0}{T_0 + T_B}, \quad P_{H.ф.}(t_3) \approx k_r P_{\Sigma}(t_3). \quad (3.22)$$

3.3. Способы повышения надежности электронной аппаратуры

Для достижения надежности используются общие и специальные способы.

Общие способы повышения надежности в стадии проектирования:

- максимальное упрощение аппаратуры (но не в ущерб заданным выходным параметрам);
- тщательный выбор элементов по основным техническим параметрам и надежности; желательно, чтобы коэффициенты нагрузки не превышали 0,6 - 0,7, что обеспечит надежную работу элементов даже при наиболее неблагоприятных разбросах параметров;
- снижение температуры внутри блоков, а также уменьшение воздействия вибрационных и ударных нагрузок;
- применение более надежных полупроводниковых приборов повышенной степени интеграции;
- широкое использование унифицированных узлов, проверенных и отработанных в условиях массового выпуска и обладающих высокой надежностью;
- облегчение технического обслуживания и ремонта аппаратуры в условиях эксплуатации;
- обеспечение разработчиков возможно более полной информацией об опыте эксплуатации ранее выпущенной аппаратуры.

Общие способы повышения надежности в стадии производства:

- точное соблюдение требований технологии, чертежей, технических условий и другой документации на всех участках производства; обеспечение ритмичной работы и высококвалифицированный технический контроль;
- тщательный контроль материалов и комплектующих изделий, поступающих на предприятие;
- автоматизация изготовления элементов, а также сборки, монтажа и регулировочных процессов;
- разработка технологии, обеспечивающей высокое качество всех производственных процессов.

Специальными способами повышения надежности являются: использование элементов в разгруженном режиме, тренировка элементов перед использованием их в аппаратуре и резервирование.

Использование элементов в разгруженном режиме. Изложим методику определения допустимых коэффициентов нагрузки основных элементов при заданной вероятности безотказной работы системы. После того как электрическая схема разработана, выбраны число и типы элементов и определены их коэффициенты нагрузки, практически можно влиять лишь на коэффициенты нагрузки конденсаторов и сопротив-

лений, выбирая их соответственно по рабочему напряжению и допустимой мощности рассеяния.

На основе анализа режимов элементов (за исключением сопротивлений и конденсаторов) находим соответствующие коэффициенты нагрузки и с учетом окружающей температуры определяем интенсивности отказов этих элементов. Предположим, что система состоит только из транзисторов, сопротивлений и конденсаторов. В этом случае экспоненциальный закон надежности имеет вид

$$P(t) = e^{-(\lambda_1 n_1 + \lambda_2 n_2 + \lambda_3 n_3) t}, \quad (3.23)$$

где $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ - интенсивности отказов транзисторов, конденсаторов и сопротивлений соответственно;

n_1, n_2, n_3 - число транзисторов, конденсаторов и сопротивлений соответственно. Логарифмируя выражение (3.23), получаем

$$\ln P(t) = -(\lambda_1 n_1 + \lambda_2 n_2 + \lambda_3 n_3) t \quad (3.24)$$

или

$$\lambda_2 n_2 + \lambda_3 n_3 = -\frac{\ln P(t)}{t} - \lambda_1 n_1, \quad (3.25)$$

где все величины за исключением λ_2 и λ_3 известны. Построив зависимость $\lambda_2 = f(\lambda_3)$, выберем некоторую величину опасности отказов сопротивлений λ_3 и по полученному графику найдем, какой опасностью отказов λ_2 должны обладать конденсаторы.

С помощью графиков приложения 5 рис. 5.2 а, б определим коэффициенты нагрузок, соответствующие полученным значениям λ_2 и λ_3 , и произведем окончательный выбор конденсаторов и сопротивлений.

Если в результате расчета окажется, что сумма $\lambda_2 n_2 + \lambda_3 n_3 < 0$, т. е. правая часть равенства является отрицательной, значит требуемая вероятность исправной работы $P(t)$ при принятом значении λ_1 , не может быть обеспечена.

Если при расчете окажется, что для обеспечения заданной вероятности исправной работы требуются слишком низкие значения коэффициентов нагрузки сопротивлений и конденсаторов, то следует обеспечить меньшие значения коэффициентов нагрузки (например, с большими допустимыми мощностями).

Другими способами повышения надежности элементов являются: электротермотренировка элементов перед их установкой в изделия; резервирование функционирования изделий электронных средств.

Тренировка элементов перед их использованием в аппаратуре. Тренировкой элементов достигается сокращение этапа приработки, характеризующегося повышенной интенсивностью отказов.

Важно правильно выбирать коэффициенты нагрузки элементов во время тренировки. Чем ниже коэффициент нагрузки k_H элементов в период тренировки, тем длительнее оказывается этап нормальной работы, т. е. износ тренированных элементов,

установленных в изделия, будет наступать позднее, но и этап тренировки будет продолжительнее.

Цель тренировки - выявление элементов с действительными и потенциальными отказами из готовой продукции до установки их в изготавливаемое изделие электронных средств. Перед тренировкой все элементы проверяются на соответствие техническим условиям (ТУ), если они удовлетворяют требованиям ТУ, то их подвергают тренировке при заданных условиях нагрузки и затем производят повторную проверку на соответствия ТУ.

Рассмотрим, каким образом тренировка позволяет обеспечивать потребителя надежными элементами. Для этого воспользуемся законом распределения Вейбулла, и будем считать, что оно достаточно описывает распределение времени до отказа элементов.

Как указывалось ранее, плотность распределения времени до отказа по закону распределения Вейбулла задается выражением

$$\varphi(t) = \rho \cdot \beta \cdot t^{\beta-1} \cdot e^{-\rho \cdot t^\beta}, \text{ при } \rho > 0, \quad (3.26)$$

где ρ, β – параметры распределения функции $\varphi(t)$;

β – коэффициент формы распределения.

Известно, что интенсивность отказов $\lambda(t)$ как функция времени, связана с характеристикой $\varphi(t)$ зависимостью вида

$$\lambda(t) = \frac{\varphi(t)}{P(t)}, \quad (3.27)$$

где $P(t)$ – вероятность безотказной работы элементов за время t .

После некоторых преобразований получим

$$\lambda(t) = \rho \cdot \beta \cdot t^{\beta-1} \quad (3.28)$$

На основании полученного выражения при нескольких значениях вейбулловского параметра формы β , получим графики зависимости $\lambda(t) = f(t)$, рис. 3.1.

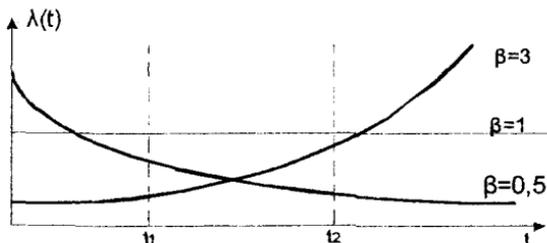


Рис. 3.1. Зависимость интенсивности отказов от времени при разных значениях коэффициента формы β

Предположим, что тренировка длится до точки t_1 и наша цель добиться минимальной средней интенсивности отказов λ в интервале от t_1 до t_2 . Покажем характеристику к трем случаям указанным на рис. 3.1.

1. Если $\beta > 1$, то тренировка приведет к увеличению интенсивности отказов за период от t_1 до t_2 , по сравнению с интенсивностью отказов за тот же интервал времени начинающийся от 0.

2. Если $\beta = 1$, то средняя интенсивность отказов постоянна на всем интервале времени и тренировка не улучшает и не ухудшает надежности выпускаемой продукции.

3. Если $\beta < 1$, то средняя интенсивность отказов на интервале от t_1 до t_2 ниже, чем она составляет за тот же интервал времени, начинающийся от 0.

Таким образом, проведение тренировки с целью отбраковки имеет смысл только тогда, когда интенсивность отказов для данного типа элементов уменьшается со временем. Если вейбулловское распределение подходит для описания распределения времени до отказа, то тренировка целесообразна тогда, когда параметр формы $\beta < 1$. При экспоненциальном законе распределения времени до отказа тренировка не дает положительного эффекта, т.к. оно является частным случаем закона распределения Вейбулла при $\beta = 1$.

ГЛАВА 4. Основные показатели эксплуатационной надежности

4.1. Показатели надежности

Рассмотренные в [5, 7, 8] понятия и определения являются качественными характеристиками надежности. Для количественного выражения надежности (ее составляющих) объекта и для планирования эксплуатации используют специальные характеристики - показатели надежности. Они позволяют оценивать надежность объекта или его элементов в различных условиях и на разных этапах эксплуатации. Показатели надежности могут иметь размерность или быть безразмерными величинами.

Так как на надежность объекта оказывают влияние многочисленные факторы, то количество показателей надежности может быть большим. Для ограничения этого их целесообразно подчинить определенным требованиям:

- а) согласованность с понятием «эксплуатационная надежность»;
- б) возможность их числового определения или задания;
- в) возможность их расчета по данным эксплуатации и проектирования;
- г) достаточная универсальность;
- д) простота и удобство применения.

Показатели надежности должны характеризовать количественно свойства конкретного объекта, определяющие его надежность. При изучении показателей надежности следует различать:

- а) наименование;
- б) численное значение, которое может изменяться в зависимости от условий эксплуатации объекта и степени его совершенства;
- в) формулировку, содержащую указания о способах, определения численного значения.

По количеству характеризующих показателей надежности свойств последние подразделяются на две группы: *единичные показатели* и *комплексные показатели*.

Единичным показателем надежности называют показатель, относящийся к одному из свойств, определяющих надежность объекта. Показатель, относящийся к нескольким свойствам, составляющим надежность объекта, называют комплексным показателем надежности.

В зависимости от условий получения необходимых для расчета статистических данных показатели надежности могут иметь значения: *опытные, оценочные, экстраполированные, прогнозируемые*.

Следует учитывать, что единичные показатели надежности для восстанавливаемых и невосстанавливаемых объектов могут быть различными. Так как надежность сложное свойство, то должны быть различные единичные показатели для оценки ее частных свойств: *безотказности, долговечности, ремонтпригодности и сохраняемости*.

Показатели безотказности

Невосстанавливаемый объект:

- 1) вероятность безотказной работы;
- 2) интенсивность отказов;
- 3) средняя наработка до отказа;

Восстанавливаемый объект:

- 1) вероятность безотказной работы;
- 2) параметр потока отказов;
- 3) средняя наработка на отказ.

Показатели долговечности

Невосстанавливаемый объект:

- 1) средний срок службы;
- 2) средний срок службы до списания;
- 3) гамма-процентный срок службы;
- 4) назначенный ресурс;
- 5) средний ресурс;
- 6) гамма-процентный ресурс,

Восстанавливаемый объект:

- 1) средний срок службы;
- 2) средний срок службы до списания;
- 3) гамма-процентный срок службы;
- 4) средний срок службы до среднего (капитального) ремонта;
- 5) средний срок службы между средними (капитальными) ремонтами;
- 6) назначенный ресурс;
- 7) средний ресурс;
- 8) гамма-процентный ресурс;
- 9) средний ресурс между средними (капитальными) ремонтами;
- 10) средний ресурс до списания;
- 11) средний ресурс до среднего (капитального) ремонта.

Показатели ремонтпригодности;

- 1) вероятность восстановления в заданное время;
- 2) среднее время восстановления.

Показатели сохраняемости

- 1) средний срок сохраняемости;
- 2) гамма-процентный срок сохраняемости.

К комплексным показателям надежности относятся:

- 1) коэффициент готовности;
- 2) коэффициент технического использования;
- 3) коэффициент оперативной готовности;
- 4) средняя и удельная суммарная трудоемкости технического обслуживания;
- 5) средняя и удельная суммарные трудоемкости ремонтов.

4.2. Безотказность

Понятие безотказности является одним из важнейших в теории надежности, так как оно непосредственно связано с выполнением объектом своих функций в условиях эксплуатации. Часто в литературе надежность рассматривается в узком смысле слова и отождествляется в первую очередь с безотказностью объекта. В настоящее время математические методы оценки безотказности развиты наиболее полно.

В дальнейшем *под безотказностью будем понимать свойство объекта непрерывно сохранять работоспособность в течение некоторого времени или некоторой наработки.*

Для количественной оценки безотказности невосстанавливаемых объектов будем использовать единичные показатели безотказности.

Основной количественной мерой является вероятность безотказной работы $[P(t)]$ - вероятность того, что в пределах заданной наработки отказ объекта не возникнет.

Понятие «наработка» - широко используется в теории надежности как термин, определяющий продолжительность или объем работы объекта.

Возникновение отказа является случайным событием, поэтому время появления отказа t_0 - также случайная величина.

Согласно определению для вероятности безотказной работы можно записать

$$P(t) = \text{Вер}\{t \leq t_0\}, \quad (4.1)$$

где t - текущее время.

Вероятность появления отказа - величина обратная вероятности безотказной работы:

$$q(t) = \text{Вер}\{t > t_0\}, \quad (4.2)$$

т. е. вероятность появления отказа можно рассматривать как вероятность того, что случайная величина t_0 примет значение меньше рассматриваемого времени t . Это позволяет рассматривать $q(t)$ как функцию распределения случайной величины t_0 - времени до появления первого отказа.

Функция распределения $q(t)$ обладает следующими свойствами:

- неубывающая, т. е. при $t_2 > t_1$, $q(t_2) > q(t_1)$;
- в начальный момент отсчета времени при $t = 0$, $q(t_2) = 0$;
- в пределе стремится к единице:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} q(t) = 1$$

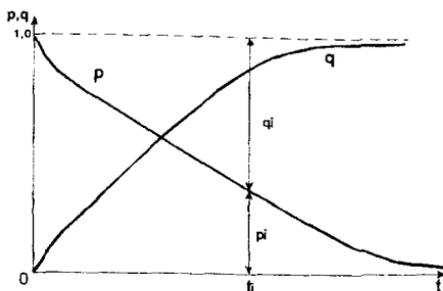


Рис. 4.1. Функциональные зависимости $P(t)$ и $q(t)$ в пределе стремятся к единице: $\lim_{t \rightarrow \infty} q(t) = 1$,

Функциональные зависимости $p(t)$ и $q(t)$ показаны на рис. 4.1. Помимо интегральной характеристики, какой является функция распределения $q(t)$, широкое распространение находит дифференциальная характеристика в виде функции плотности распределения $f(t)$:

$$f(t) = \frac{q(t + \Delta t) - q(t)}{\Delta t} = q'(t) \text{ при } \Delta t \rightarrow 0 \quad (4.3)$$

или

$$q(t) = \int_0^t f(\tau) d\tau. \quad (4.4)$$

С учетом выражения (4.4) выражение (4.1) может быть записано как

$$p(t) = 1 - \int_0^t f(\tau) d\tau = \int_0^{\infty} f(\tau) d\tau. \quad (4.5)$$

Дифференцируя по времени выражение (4.2), нетрудно получить

$$q'(t) = f(t) = -dp(t)/dt = -p'(t). \quad (4.6)$$

Выражения (4.4), (4.5) и (4.6) определяют взаимосвязь $p(t)$, $q(t)$ и $f(t)$

Важной характеристикой безотказности является интенсивность отказов $[\lambda(t)]$ - условная плотность вероятности возникновения отказа невосстанавливаемого объекта, определяемая для рассматриваемого момента времени при условии, что до этого момента отказ не возник.

Исходя из определения для момента времени $(t, t + \Delta t)$ с учетом выражения (4.4) можно записать:

$$q(t, t + \Delta t) = p(t) \lambda(t) \Delta t \quad q(t, t + \Delta t) = f(t) \Delta t \quad (4.7)$$

Из выражения (4.7) следует

$$\lambda(t) = f(t) / p(t) \quad (4.8)$$

Воспользовавшись выражениями (4.6) и (4.8), можно составить дифференциальное уравнение безотказности:

$$\lambda(t) = -\frac{dp(t)}{p(t)dt}; \quad \lambda(t)dt = -\frac{dp(t)}{p(t)} \quad (4.9)$$

Решение этого дифференциального уравнения относительно $p(t)$ имеет вид

$$p(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t)dt} + c \quad (4.10)$$

Значение постоянной c найдем воспользовавшись начальными условиями $t=0: p(0) = 1$, следовательно, $c = 0$.

Окончательно решение дифференциального уравнения (4.9) принимает вид

$$p(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t)dt} \quad (4.11)$$

Из выражения (4.9) получим

$$\int_0^t \lambda(t) dt = -\ln p(t) \quad (4.12)$$

Воспользовавшись выражениями (4.8), (4.11) и (4.12), найдем выражение, связывающее их между собой:

$$f(t) = -\lambda(t)p(t) = \lambda(t)e^{-\int_0^t \lambda(t)dt} \quad (4.13)$$

Воспользовавшись полученными выражениями, зная одну из функций, можно найти остальные.

Если объект содержит N - последовательно включенных однотипных элементов, то интенсивность отказов определяется выражением

$$\lambda(t), 1/\psi = N\lambda(t) \quad (4.14)$$

При наличии в объекте k - групп различных элементов выражение (4.14) примет вид

$$\lambda(t), 1/\psi = \sum_{i=1}^K N_i \lambda_i(t) \quad (4.15)$$

Зависимость интенсивности отказов от времени эксплуатации для сложных объектов ЭиВС показана на рис. 4.2.

На нем четко различаются три участка: I – приработки; II – нормальной эксплуатации; III – старения.

Характерным для первого участка является снижение интенсивности отказов со временем. Это объясняется быстрым выявлением наименее надежных объектов

(элементов). Второй участок отражает период, когда интенсивность отказов стабилизируется. Третий участок показывает резкое увеличение отказов, что объясняется приближением объектов к предельному состоянию. Этот период из эксплуатации, как правило, исключается.

Средняя наработка до отказа (T_0) – это математическое ожидание наработки до первого отказа.

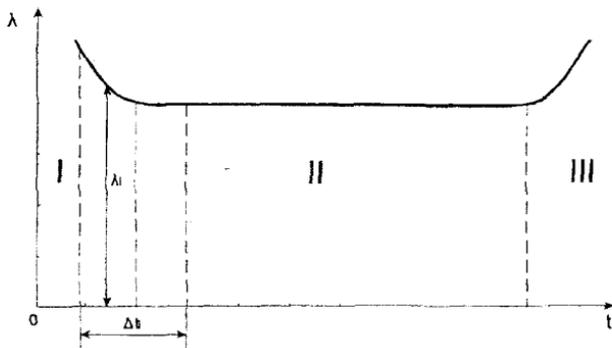


Рис. 4.2. Зависимость интенсивности отказов от времени эксплуатации

В соответствии с определением

$$T_0 = \int_0^{\infty} tf(t) dt = - \int_0^{\infty} tp'(t) dt \quad (4.16)$$

Интегрируя полученное выражение по частям, получаем

$$T_0 = -tp(t)|_0^{\infty} + \int_0^{\infty} p(t) dt = \int_0^{\infty} p(t) dt \quad (4.17)$$

Для восстанавливаемых объектов характерно чередование исправного состояния и восстановления после отказа, т. е. процесс их эксплуатации можно представить как последовательное чередование интервалов времени работоспособного и неработоспособного состояний (рис. 4.3). Появление отказов в каждом из N объектов можно рассматривать как поток требований для восстановления. Математическое ожидание числа отказов за время t рассматриваемого потока может быть определено выражением 4.18.

$$M(t) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N m_i(t), \quad (4.18)$$

где $m_i(t)$ – число отказов i -го объекта за время t

На основании временной оси (рис. 4.3) наработку на отказ понимают величину, определяемую как:

$$T_0 = \sum_{i=1}^m t_i / m \quad (4.19)$$

Показатель T_0 имеет смысл только применительно к восстанавливаемым устройствам. Его называют средней наработкой на отказ, что понятно из выражения 4.19. Если поток отказов изделий данного типа стационарный, то наработку на отказ T_0 можно определить по нескольким экземплярам, используя выражение:

$$T_0 = \frac{\sum_{j=1}^M T_j}{\sum_{j=1}^M m_j}, \quad (4.20)$$

где M – количество экземпляров;

T_j – суммарное время безотказной работы j -го экземпляра;

m_j – количество отказов j -го экземпляра.

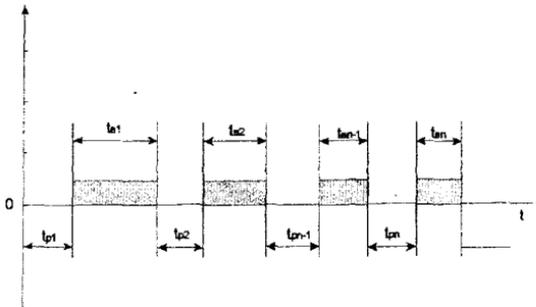


Рис. 4.3. Характеристики процесса эксплуатации восстанавливаемого объекта:

t_p – время наработки между соседними отказами;

t_o – время восстановления после i -го отказа;

Значения рассмотренных параметров могут быть также найдены на основании обработки статистического материала результатов эксплуатации или же специально проводимого эксперимента с группой объектов данного типа.

4.3. Долговечность

Время функционирования всякого объекта ограничено неизбежным изменением свойств материалов и деталей, из которых он изготовлен. Поэтому период нормального функционирования различных объектов ЭИВС будет не одинаков, так как его длительность зависит от свойств, присущих данному объекту. Эти свойства определяются термином «долговечность».

Под долговечностью подразумевается свойство объекта сохранять работоспособность до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонтов.

Следует обратить внимание на то, что в отличие от определения безотказности (где главным является непрерывность сохранения работоспособности) определение долговечности связано с сохранением работоспособности до заданного предела с необходимыми перерывами.

Для невосстанавливаемых элементов (интегральные схемы, транзисторы, конденсаторы и т. п.) значение долговечности совпадает со временем их эксплуатации до отказа.

С целью количественной оценки свойств объекта, объединяемых понятием «долговечность», используются единичные показатели долговечности, такие как: срок службы и ресурс.

Срок службы определяется календарной продолжительностью, эксплуатации объекта от начала эксплуатации или ее возобновления после среднего (капитально-го) ремонта до предельного состояния.

Для восстанавливаемых и невосстанавливаемых объектов различают *средний срок службы, средний срок службы до списания и гамма-процентный срок службы*.

Средний срок службы $T_{cp.сл}$ – математическое ожидание срока службы:

$$T_{cp.сл} = \int_0^{\infty} t_{cнi} f(t_{cн}) dt \quad (4.21)$$

средний срок службы до списания $T_{ср.сл.сн}$ – это *средний срок службы от начала эксплуатации до его списания, обусловленного предельным состоянием*.

Значение этой величины определяется на основании статистических данных эксплуатации интересующей аппаратуры.

Гамма-процентный срок службы $T_{сл,\gamma}$ – срок службы, в течение которого объект не достигает предельного состояния с заданной вероятностью γ процентов.

Гамма-процентный срок службы определяется выражением

$$1 - q(T_{сл,\gamma}) = P(T_{сл,\gamma}) = \gamma/100 \quad (4.22)$$

Полагая закон распределения времени безотказной работы элементов объекта экспоненциальным и воспользовавшись выражением (4.20) и (4.22), запишем

$$e^{-\lambda T_{сл,\gamma}} = \gamma/100 \quad (4.23)$$

Логарифмируя данное выражение, получим

$$T_{сл,\gamma} = -\frac{1}{\lambda} \ln \frac{\gamma}{100} = -T_0 \left(-\ln \frac{\gamma}{100} \right) \quad (4.24)$$

Выражение (4.24) позволяет связать безотказность комплектующих объект элементов с его долговечностью. При $\gamma = 90\%$ из выражения (4.24) следует

$$T_{ср90\%} = 0,105T_0 \quad (4.25)$$

Применительно к восстанавливаемым объектам различают также *средний срок службы между средними (капитальными) ремонтами и ередний срок службы до среднего (капитального) ремонта.*

$T_{ср.сл.мр}$ – средний срок службы между смежными средними ремонтами.

Значение этой величины определяется на основании статистических данных эксплуатации данной аппаратуры.

Средний срок службы до среднего (капитального) ремонта $T_{ср.сл.ср.(к.р)}$ *средний срок службы от начала эксплуатации объекта до его первого среднего (капитального) ремонта.*

Его значение также определяется на основании статистических данных эксплуатации аппаратуры.

Как уже отмечалось, существует связь между сроком службы сложного объекта и долговечностью комплектующих его элементов. Момент отказа объекта наступает тем раньше, чем меньше долговечность комплектующих элементов.

Ресурсом называют наработку объекта от начала эксплуатации или же возобновления после среднего или капитального ремонта до наступления предельного состояния.

Для восстанавливаемых и невосстанавливаемых объектов различают *назначенный ресурс, средний ресурс и гамма-процентный ресурс.*

Назначенный ресурс R_H – суммарная наработка объекта, при достижении которой эксплуатация должна быть прекращена независимо от его состояния.

Средний ресурс $R_{ср}$ – математическое ожидание ресурса:

$$R_{ср} = \int_0^{\infty} r_i f(r) dt, \quad (4.26)$$

где r_i – ресурс работы i -го элемента (объекта); $f(r)$ – функция плотности распределения, величины r .

Гамма-процентный ресурс R_γ – наработка, в течение которой объект не достигает предельного состояния с заданной вероятностью γ процентов.

Для определения гамма-процентного ресурса можно воспользоваться выражением (4.22), подставляя вместо функции распределения срока службы значение функции распределения ресурса.

Помимо рассмотренных показателей для восстанавливаемых объектов различают *средний ресурс между средними (капитальными) ремонтами, средний ресурс до списания и средний ресурс до среднего (капитального) ремонта.*

Средний ресурс до списания $R_{ср.сп}$ – средний ресурс объекта от начала эксплуатации до его списания, обусловленного предельным состоянием. Его значение определяется также на основании статистических данных эксплуатации аппаратуры.

Средний ресурс до среднего (капитального) ремонта $R_{ср.с.р.}(к.р)$ – средний ресурс от начала эксплуатации объекта до его первого среднего (капитального) ремонта; определяется на основе статистических данных эксплуатации интересующей аппаратуры.

4.4. Ремонтпригодность

Термин «ремонтпригодность» оценивает свойства объекта, связанные с поддержанием и восстановлением его работоспособности.

Под ремонтпригодностью понимают свойство объекта, заключающееся в приспособленности к предупреждению и обнаружению причин возникновения его отказов, повреждений и устранений их последствий путем, проведения ремонтов и технического обслуживания.

Техническое обслуживание предусматривает совокупность технических и организационных мероприятий, обеспечивающих поддержание объекта в работоспособном состоянии на различных фазах и этапах эксплуатации.

Под ремонтом понимают организацию и выполнение работ по восстановлению работоспособности и ресурса работы объекта (элемента).

Следует подчеркнуть, что как восстанавливаемые, так и невосстанавливаемые объекты (элементы), подлежат техническому обслуживанию для предупреждения и обнаружения отказов.

Так как понятие «ремонтпригодность» – качественная характеристика объекта, то для его количественной оценки применяются единичные показатели ремонтпригодности: *вероятность восстановления в заданное время и среднее время восстановления*. Естественно, что эти показатели относятся только к восстанавливаемым объектам.

Вероятность восстановления $P_B(t)$ – вероятность того, что фактическая продолжительность работ по восстановлению работоспособности объекта не превысит заданной. Математически это может быть записано в виде

$$P_B(t) = \text{Вер}\{t_B \leq t\}, \quad (4.27)$$

где t_B – время восстановления объекта.

Вероятность восстановления может рассматриваться как функция распределения случайной величины t_B времени восстановления объекта.

Для удобства математического описания процесса восстановления введем понятие «интенсивность восстановления» $\mu(t)$ – вероятность восстановления работоспособности объекта в единицу времени при условии, что до этого времени восстановление не произошло.

Для простоты рассмотрения будем полагать, что время восстановления распределено по экспоненциальному закону. Это условие само по себе является жестким и в ряде случаев хорошо описывающим реальные процессы.

В случае реализации указанного условия $\mu(t) = \mu = const$ будем рассматривать восстановление объекта в промежутке времени $t, t + \Delta t$. Вероятность этого события может быть рассмотрена как вероятность реализации двух несовместных событий: восстановление объекта к моменту t и восстановление объекта за промежуток времени $t + \Delta t$. В этом случае

$$P_B(t, t + \Delta t) = P_B(t) + [1 - P_B(t)]\mu\Delta t. \quad (4.28)$$

Переходя к пределу, получаем дифференциальное уравнение первого порядка

$$\frac{dP_B(t)}{dt} = [1 - P_B(t)]\mu \quad (4.29)$$

Решение этого уравнения с учетом начальных условий $[t = 0, P(0) = 0]$ имеет вид

$$P_B(t) = 1 - e^{-\mu t} \quad (4.30)$$

Среднее время восстановления $T_{в.ср}$ – математическое ожидание времени восстановления работоспособности. Согласно определению нетрудно записать

$$T_{в.ср} = M_B(t) = \int_0^{\infty} t f_B(t) dt, \quad (4.31)$$

где $f_B(t) = P_B'(t)$ – плотность распределения случайной величины времени восстановления.

Для случая экспоненциального распределения времени восстановления

$$T_{в.ср} = \int_0^{\infty} t P_B'(t) dt = \int_0^{\infty} t \mu e^{-\mu t} dt = \frac{1}{\mu} \quad (4.32)$$

В ряде случаев, особенно когда объект ЭИВС по назначению работает с перерывами, можно указать допустимое время простоя для отыскания и устранения отказа $T_{п.д}$ исходя из условий его применения. Если удовлетворяется неравенство $T_{п.д} < T_{в}$, то такой объект не будет прекращать своего функционирования. Действительно, если время простоя для объектов дискретной ЭИВС меньше времени между двумя последовательными сообщениями, то такая аппаратура будет функционировать без перебоев.

Вероятность восстановления в значительной степени зависит от соотношения допустимого времени простоя к среднему времени восстановления. На величину этого отношения значительное влияние оказывают конструктивные характеристики объектов ЭИВС и квалификация обслуживающего персонала.

Следовательно, ремонтпригодность объекта в значительной мере определяется мероприятиями, предусмотренными и проведенными при его проектировании и изготовлении. Немалое влияние на ремонтпригодность оказывает также эксплуатация объекта, так как в этот период действуют такие факторы, как организация технического обслуживания и восстановления, подготовка операторов, снабжение запасными элементами и т. п.

Исследования последних лет показали, что, несмотря на большое разнообразие объектов ЭиВС, имеется много общих закономерностей в организации технического обслуживания и восстановления позволяющих использовать общую методику подхода к ее решению.

Организация эксплуатации ЭиВС, восстановления и ремонта должна основываться на выводах и рекомендациях теории эксплуатации.

4.5. Сохраняемость

Немаловажным, особенно для объектов с длительными сроками хранения, является свойство объекта сохранять на этапах хранения и транспортировки свои заданные эксплуатационные свойства. Эти свойства объекта определяются понятием «сохраняемость».

Следует отметить, что согласно определению сохраняемость может рассматриваться как специфический случай безотказности, распространяемый только на этапы хранения и транспортировки. Это вызвано значительным удельным весом этих этапов в эксплуатации объектов ЭиВС.

В качестве единичных показателей, позволяющих количественно определить сохраняемость, используют *средний срок сохраняемости и гамма-процентный срок сохраняемости*,

Средний срок сохраняемости $T_{сохр.ср}$ математическое ожидание срока сохраняемости.

$$T_{сохр.ср} = \int_0^{\infty} t_{сохр} f(t_{сохр}) dt \quad (4.33)$$

Гамма-процентный срок сохраняемости $T_{сохр. \gamma}$ – срок сохраняемости, который будет достигнут объектом с заданной вероятностью в процентах.

Гамма-процентный срок сохраняемости может быть определен, если подставить вместо функции распределения срока службы значение функции распределения срока сохраняемости.

Аналитически показатели сохраняемости можно рассчитать, используя выражение (4.20) (при экспоненциальном распределении времени безотказной работы элементов) и подставляя в него значения λ - показателей элементов для этапов хранения и транспортировки.

4.6. Комплексные показатели надежности

В ряде случаев для оценки эксплуатационных качеств объекта одних единичных показателей надежности бывает недостаточно. Возникает необходимость в более

сложных показателях, которые относились бы сразу к нескольким свойствам, составляющим надежность объекта. Такие показатели называют комплексными показателями надежности.

К ним относятся: *коэффициент готовности, коэффициент технического использования и коэффициент оперативной готовности.*

Коэффициент готовности K_G – вероятность того, что объект (элемент) окажется работоспособным в произвольный момент времени, кроме планируемых периодов, в течение которых использование объекта по назначению не предусматривается.

По статистическим данным эксплуатации коэффициент готовности объекта определяется как отношение суммарного времени пребывания наблюдаемого объекта в работоспособном состоянии ко всему времени его эксплуатации.

Если принять простейшую систему эксплуатации объекта работа-восстановление (немедленное начало) – работа, то для определения значения коэффициента готовности можно записать

$$K_G = \frac{T}{T + T_B}, \quad (4.34)$$

где T – наработка на отказ; T_B – среднее время восстановления. Коэффициент готовности может быть определен как для одиночного объекта, так и для группы объектов.

Из приведенного выражения следует, что увеличить значение коэффициента можно, увеличивая безотказность объект или же всемерно сокращая время восстановления.

В ряде литературных источников встречается понятие – *коэффициент простоя*, т. е. коэффициент, определяющий вероятность того, что объект (элемент) будет неработоспособным в произвольно выбранный момент времени. Коэффициент простоя

$$K_{II} = \frac{T_B}{T + T_B} \quad (4.35)$$

Согласно выражениям (4.34) и (4.35) можно записать

$$K_G = 1 - K_{II} \quad (4.36)$$

Коэффициенты готовности и простоя являются вероятностями противоположных случайных событий,

Коэффициент технического использования $K_{т.и}$ – отношение математического ожидания времени пребывания объекта в работоспособном состоянии за некоторый период эксплуатации к сумме математических ожиданий времени пребывания объекта в работоспособном состоянии, времени простоев, обусловленных техническим обслуживанием, и времени ремонтов за тот же период эксплуатации.

Помимо коэффициента технического использования для оценки трудоемкости технического обслуживания также используют и другие показатели.

Средняя суммарная трудоемкость технического, обслуживания – математическое ожидание суммарных трудозатрат на проведение технического обслуживания объекта (элемента) за определенный период эксплуатации. Отношение этого показателя к математическому ожиданию суммарной наработки объекта (элемента) за тот же период эксплуатации называют удельной суммарной трудоемкостью технического обслуживания.

Для оценки трудоемкости ремонтов используют аналогичный показатель – *среднюю суммарную трудоемкость ремонтов*, понимая под этим математическое ожидание суммарных трудозатрат на все виды ремонтов объекта (элемента) за определенный период эксплуатации. Отношение этого показателя к математическому ожиданию суммарной наработки объекта (элемента) за тот же период эксплуатации называют *удельной суммарной трудоемкостью ремонтов*.

Режим ожидания представляет собой режим эксплуатации, когда объект находится в состоянии полной или облегченной нагрузки в ожидании выполнения своих функций по назначению. Необходимость использования возникает внезапно, после чего объект безотказно функционирует в течение времени t_p . Для выполнения задачи в момент поступления требования объект должен быть работоспособным. Следовательно, в режиме ожидания возможно появление отказов и возникает необходимость его восстановления. Для оценки надежности объектов подобного типа используется комплексный показатель – коэффициент оперативной готовности.

Коэффициент оперативной готовности $K_{o.z}$ – вероятность того, что объект, находясь в режиме ожидания, окажется работоспособным в произвольный момент времени t , начиная с этого момента, будет работать безотказно в течение заданного интервала времени.

Если известна вероятность безотказной работы объекта за время t_p и она не зависит от момента поступления требования, то можно записать

$$K_{o.z} = K_z P(t_p) \quad (4.37)$$

Важным для оценки условий эксплуатации объекта является коэффициент, нагрузки, позволяющий учитывать влияние различных факторов на объект в период его эксплуатации.

Коэффициент нагрузки K_n – отношение реальной рабочей нагрузки, действующей на объект (элемент) в данных условиях, к номинальной нагрузке, предусмотренной для данного объекта (элемента) в заданных условиях эксплуатации:

$$K_n = F_p / F_n, \quad (4.38)$$

где F_p – реальная нагрузка; F_n – номинальная нагрузка.

В данном случае понятие нагрузка имеет самый широкий смысл: тепловая нагрузка, электрическая нагрузка, механическая нагрузка и т. п.

Рассмотренные комплексные показатели надежности определяются на основании статистических данных эксплуатации интересующих объектов или же на основании данных специально-проводимых экспериментов с этими объектами.

Кроме рассмотренных в ряде случаев принимают и другие комплексные показатели надежности. Например, для оценки стоимости эксплуатации: стоимость технического обслуживания, стоимость ремонтов и т. п.

Следует отметить, что в литературе по вопросам эксплуатации и надежности также широко используют вместо терминов «объект» и «элемент» термины «оборудование» и «аппаратура». В дальнейшем при рассмотрении эксплуатации реальных объектов ЭиВС в пособии использованы и эти термины.

4.7. Влияние различных факторов на показатели надежности

В процессе производства и эксплуатации на ЭиВС действует множество различных факторов, влияющих на ее надежность. Их влияние на составляющие надежности и их показатели различно.

На рис. 4.5. приведена классификация этих факторов. Все факторы можно разделить на две группы: *объективные факторы* и *субъективные факторы*.

К группе объективных факторов относятся: *эксплуатационные, климатические и биологические*.

К группе субъективных факторов относятся ошибки людей при разработке, производстве и эксплуатации. К факторам, определяющим надежность ЭиВС на этапах разработки и производства, относятся: выбор схемных решений, выбор элементов и режим их работы, выбор конструктивных решений, выбор и соблюдение технологии производства, автоматизация производства, тренировка элементов и аппаратуры, контроль, качества и т. п. Все перечисленные факторы оказывают значительное влияние на надежность ЭиВС, поступающей в эксплуатацию. Об этом достаточно изложено в литературе [4, 5, 15].

В дальнейшем остановимся более подробно на объективных и некоторых субъективных факторах, влияющих на надежность ЭиВС в процессе ее эксплуатации, так как на их долю приходится более 30% от всех отказов. К ним относятся: время эксплуатации, электрические режимы, температура среды, влажность и атмосферные осадки, пониженное давление, солнечные и другие виды радиации и различного рода примеси в воздухе, механические нагрузки (перегрузки, удары и вибрации), биологические факторы (грибки, плесень, насекомые и грызуны), деятельность обслуживающего персонала (квалификация, проведения профилактических мероприятий, организация эксплуатации, наличие инструкций по эксплуатации данного типа аппаратуры) и т. п.

Время эксплуатации. Время эксплуатации является одним из основных факторов, определяющих надежность аппаратуры на всех этапах.

На рис. 4.2 показана зависимость интенсивности отказов от времени эксплуатации аппаратуры. Технологические и конструктивные недостатки чаще всего выявляются в первый период эксплуатации, когда интенсивность отказов во много раз больше, чем в нормальный период эксплуатации. Выход из строя конденсаторов в большинстве случаев происходит из-за пробоя диэлектрика, в результате, чего до

70% всех вышедших из строя конденсаторов приходится на этот период эксплуатации.

Таким образом, в период приработки выявляются многие явные и скрытые дефекты аппаратуры в целом и ее элементов. В этот же период осуществляется выходной контроль ЭИВС на изготовляющем ее производстве.

Длительность этого периода для различной аппаратуры, может колебаться от нескольких десятков до сотен часов (от 1 до 15% от длительности периода нормальной эксплуатации). Наиболее важную аппаратуру принято подвергать предварительной тренировке в течение определенного времени с тем, чтобы еще до эксплуатации у потребителя она выработала время приработки и ненадежные элементы и узлы были своевременно устранены. Это связано с расходом определенного ресурса работы аппаратуры, но зато уменьшает количество отказов, приходящихся на этап использования по назначению. Как уже отмечалось, для периода нормальной эксплуатации справедлив экспоненциальный закон надежности.



Рис 4.4. Классификация факторов, влияющих на показатели надежности

После достаточно длительной эксплуатации аппаратуры наступает последний, третий период, характеризуемый значительным возрастанием интенсивности отказов из-за старения и износа элементов. Этот период для ЭИВС наступает после нескольких сотен или тысяч часов работы. Возрастание интенсивности отказов объясняется необратимыми изменениями параметров и характеристик элементов.

Процессы старения идут непрерывно, помогут ускориться под влиянием различных факторов (тепло, влага, свет, давление и т. п.).

Причиной старения являются сложные физико-химические процессы, происходящие в элементах аппаратуры в течение всего времени ее эксплуатации. К ним относятся: структурные изменения в диэлектриках и проводниках, окисления поверхностей проводников, химические превращения в связывающих и пропиточных материалах, нарушение электрической и механической прочности материалов, диэлектрика и элементов конструкции, нарушение герметизации вследствие появления трещин и сквозных каналов, повышение водопроницаемости материалов и т. п.

Структурные изменения заключаются в том, что с течением времени происходит кристаллизация, проводящего слоя у резисторов, что неизбежно влечет за собой изменение величины его сопротивления. В полимерах структурные изменения приводят к появлению трещин, ломкости изоляции и т. д.

Сорбция (поглощение) газов и паров воды окружающей среды обуславливает изменение механических и электрических свойств пластмасс, проводящего слоя большинства пленочных резисторов (ВС, МЛТ, УЛМ и т. д.), поверхностей контактов, разрушение связующего материала объемных резисторов и т. п.

С целью замедления процесса старения широко применяют герметизацию элементов или целых узлов. Например, ее успешно используют при изготовлении конденсаторов. Так, для бумажных герметизированных конденсаторов снижение сопротивления изоляции до 25% от первоначального значения происходит только после 5000 ч работы. Особенно показательно влияние герметизации для электролитических конденсаторов, у которых значительно замедлено старение в первые 3000–4000 ч работы (до нарушения герметизации), после чего его характеристики резко ухудшаются.

Наиболее быстро стареют, детали пластмассовые из пресспорошка (каркасы катушек, корпуса переключателей и т. п.). У переменных резисторов старение заключается в изменении сопротивления проводящего слоя и его истирания, нарушении контакта между проводящим слоем и движком. Монтажные провода приходят в негодность из-за высыхания и растрескивания изоляции. Быстро стареет пластмассовый крепеж, армированный металлом.

На механические и электромеханические элементы и узлы большее влияние, чем старение, оказывает износ (редукторы, сельсины, реле, подшипники и т. п.).

Скорость старения также определяется режимами работы и интенсивностью воздействия других факторов, в ряде случаев существенно ускоряющих этот процесс. Рассмотрим некоторые из них.

Электрические режимы. Изменения электрических режимов работы радиотехнических элементов оказывают существенное влияние на стабильность и долговечность их характеристик и параметров и, следовательно, на долговечность и надежность всей системы или объекта.

Все элементы характеризуются допустимыми нагрузками по мощности рассеяния, токам, напряжениям и т. п. Следовательно, работа элементов при предельно допустимых нагрузках сокращает их срок службы и не гарантирует надежной работы. Уменьшение фактических нагрузок увеличивает надежность работы.

О величине реальной нагрузки судят по статистическим данным эксплуатации и замерам режимов работы элементов. Для оценки режима работы используют *коэффициенты нагрузки (по мощности и по напряжению)*.

Коэффициент нагрузки по мощности

$$K_{np} = P_p / P_n \quad (4.39)$$

где P_p – рабочее значение мощности рассеяния; P_n – номинальное значение мощности рассеяния.

Коэффициент нагрузки по напряжению используют для оценки режима работы различных конденсаторов, изоляторов и т. п.

Влияние электрических нагрузок главным образом сводится к ухудшению температурного режима и появлению перенапряжения, что может вызвать пробой изоляции.

Как тот, так и другой факторы приводят к снижению надежности, появлению преждевременных отказов. Электрические режимы также влияют на зависимость надежности от числа включений, так как способствуют возникновению перенапряжений при включениях.

Элементы, работающие в ЭиВС, должны иметь соответствующий запас электрической прочности, определяемый принятым значением коэффициента нагрузки.

Чем ниже значение коэффициента электрической нагрузки, тем надежнее будет работать элемент, однако значительное его занижение влечет за собой увеличение веса, габаритов, стоимости элементов и в целом всей аппаратуры. При проектировании обычно принимают коэффициент электрической нагрузки радиотехнических элементов порядка 0,4-0,7.

Температура окружающей среды. ЭиВС эксплуатируют в различных температурных условиях. Температурное влияние тем больше, чем больше скорость и частота, изменения температуры. Наиболее тяжелыми являются полевые условия работы аппаратуры, работа ЭиВС в космических аппаратах, ракетах и самолетах. В табл. 4.1 приведены сезонные и суточные колебания температуры на территории РФ.

Таблица 4.1

Колебания температуры на территории РФ

Наименование области	Сезонные колебания температуры, °С	Суточные колебания температур, °С
Пустыня	(-10)÷(+50)	40
Умеренный пояс	(-20)÷(+40)	25
Арктическая зона	(-50)÷(+35)	20

Температура окружающей среды существенно влияет на температуру внутри аппаратуры и температуру отдельных элементов. Так, в аппаратуре, находящейся под

прямым воздействием солнечных лучей, при темной окраске поверхности возможно повышение температуры на 35 °С и более. Так как температура элемента определяется собственным нагревом и температурой среды, то такое увеличение температуры среды приведет к повышению температуры элемента. Следовательно, фактическое значение коэффициента нагрузки окажется выше расчетного.

Немаловажным фактором, влияющим на надежность, являются скорость и цикличность изменения температуры в аппаратуре. Эти факторы приводят к появлению механических знакопеременных усилий и, как следствие, к ослаблению механических креплений, появлению усталостных трещин, отпотеванию и т. п.

При низких температурах пластмассы теряют прочность, резиновые изделия становятся хрупкими и растрескиваются, металлы делаются ломкими. В образовавшиеся трещины изоляции попадает влага, снижая электрическую прочность. При низких температурах легко разрушаются соединения пластмасс с металлами, спаи металлов со стеклом, нарушается пайка, регулировка зазоров, падает емкость электрических конденсаторов и т. п.

Повышенная температура способствует ускорению распада органических изоляционных материалов, перегреву и выходу из строя полупроводниковых приборов. Высокие температуры ухудшают изоляционные свойства различного рода заливок, обмоток, механические свойства большинства полимеров, что приводит к деформации деталей и выходу их из строя или же появлению необратимых изменений параметров.

Периодические смены низких и высоких температур особенно быстро приводят к разрушению различного рода обмоток.

Влияние температуры на интенсивность отказов ЭиВС принято оценивать температурным коэффициентом интенсивности отказов

$$K_t = \left(\frac{t_p}{t_H} \right)^a, \quad (4.40)$$

где t_p – рабочая температура элемента;

t_H – номинальная температура элемента;

a – показатель степени, определяемый типом элемента.

Влажность и атмосферные осадки. Влажность является одним из наиболее сильно действующих факторов. Влажность окружающего воздуха принято оценивать относительной влажностью, представляющей собой измеряемое в процентах отношение фактически содержащейся в воздухе влаги к максимально возможному ее содержанию при данной температуре. Нормальной влажностью считается относительная влажность 60–65%. При влажности в 80% воздух считается сырým.

Для многих тропических районов характерна повышенная влажность (90–98%), сопровождаемая высокими температурами (35–40°C).

Поэтому элементы и ЭиВС, предназначенные для работы в тропиках, должны нормально функционировать в условиях температуры 40 °С и влажности 98%.

Воздействие влаги и атмосферных осадков на ЭиВС возможно в следующих условиях:

- а) поглощения водяных паров из воздуха;
- б) конденсации водяных паров на поверхности аппаратуры или в воздухе (туман);
- в) смачивания брызгами воды (дождь, снег);
- г) погружения в воду.

Способность материала адсорбировать воду в сильной степени зависит от микрорельефа поверхности и структуры материала. Так, диэлектрики с шероховатой поверхностью способны адсорбировать влаги больше, нежели с гладкой поверхностью.

Материалы, не поглощающие воду (стекло, керамика) могут образовывать пленку влаги на поверхности уже при 30% влажности, что приводит к снижению их поверхностного сопротивления.

В пористых неорганических диэлектриках (слабо отожженная керамика) происходит полимолекулярная конденсация паров воды в порах материала, а при больших размерах пор происходит капиллярная конденсация воды с заполнением всех капилляров водой.

В неорганических диэлектриках имеет место неактивированная сорбция влаги.

В случае органических диэлектриков имеет место процесс ограниченного растворения воды в материале с возможным его набуханием. Молекулы воды в результате колебаний молекул, материала внедряются все глубже в толщу материала. Степень проникновения влаги определяется плотностью макромолекул материала и его состоянием.

Помимо рассмотренных сорбционных связей воды с материалом возможна и химическая связь. В отличие от сорбционной связи, где вода не вызывает необратимых изменений материала, при химической связи она входит в структуру материала, приводит к получению новых веществ, к перестройке кристаллической решетки.

В некоторых типах диэлектриков (бумага, эфиры, целлюлоза и др.) вода связывается с материалом водородными связями.

Таким образом, поглощая воду, диэлектрики ухудшают свои электрические характеристики: падают удельные объемное и поверхностное сопротивление, уменьшается электрическая прочность. Все эти факторы приводят к изменению фактически действующего коэффициента нагрузки и снижению надежности.

Одно и тоже количество влаги по-разному влияет на различные материалы. Одни материалы резко и быстро ухудшают свои свойства, а другие сравнительно мало и медленно. Определяющим фактором ухудшения, характеристик является не количество поглощенной влаги, а ее распределение в материале, что обусловлено физико-химической структурой материала.

Эффект воздействия влаги может увеличиваться за счет дефектов поверхности элементов: появления трещин в покрытии, нарушения герметизации и т. д. Изменение характеристик диэлектриков хорошо иллюстрирует табл. 4.2.

При суточных изменениях температуры происходит частичная конденсация влаги в аппаратуре, что ухудшает условия ее работы. Конденсировавшаяся влага запол-

няет все трещины и неплотности в изоляторах и покрытиях, ухудшая их изоляционные свойства устройств и приводя к общему нарушению режимов работы аппаратуры.

Таблица 4.2

Материалы	ρ_0 , Ом, при влажности		ρ_x , Ом, при влажност.ч	
	30%	100%	0%	98%
Слюда мусковит	$1,05 \cdot 10^{10}$	$1,1 \cdot 10^7$	$2,0 \cdot 10^{14}$	$5,0 \cdot 10^9$
Стекло щелочное	-	-	$3,0 \cdot 10^{13}$	$5,0 \cdot 10^8$
Ультрафарфор (чистый)	-	-	$1,2 \cdot 10^{16}$	$1,0 \cdot 10^{13}$
Полистирол	-	-	$5,0 \cdot 10^{17}$	$2,8 \cdot 10^{15}$
Фторопласт-4	-	-	$5,0 \cdot 10^{17}$	$5,0 \cdot 10^{17}$
Полихлорвинил	-	-	$1,3 \cdot 10^{15}$	$4,2 \cdot 10^{14}$
Аминопласт	-	-	$2,1 \cdot 10^{14}$	$3,8 \cdot 10^{13}$
Полиуретан	-	-	$5,0 \cdot 10^{16}$	$7,0 \cdot 10^{14}$
Полихлорвинил	-	-	$6,6 \cdot 10^{17}$	$3,0 \cdot 10^{14}$

Влияние влажности ускоряет разрушение лакокрасочных защитных покрытий, нарушает герметизацию и заливки.

Повышенная влажность также разрушает структуру резисторов, увеличивая действительное значение сопротивления, и резко снижает их стойкость.

Воздействие влаги на элементы ЭИВС при хранении, как правило, обратимо, но при прохождении через них токов имеющих место физикохимические процессы становятся необратимыми. Особенно сильно это сказывается на тонкопленочных резисторах.

Влага также воздействует и на другие элементы ЭИВС, ухудшая их характеристики: окисляя контакты, уменьшая сопротивление между выводами, приводя к коррозированию металлических частей конструкции.

Следует отметить, что помимо прямого влияния на электрические параметры элементов влага при циклической смене положительных и отрицательных температур, проникая в трещины и повреждая герметизацию, содействует их механическому повреждению.

Таким образом, повышенная влажность сильно снижает надежность ЭИВС, ухудшая ее эксплуатационные свойства.

Пониженное давление. Воздействие пониженного давления в основном распространяется на аппаратуру, используемую в самолетах, вертолетах, космических аппаратах, ракетах, а также в горной местности на высоте свыше 1000 м.

Величина атмосферного давления зависит от высоты подъема температуры и широты местности. Зависимость атмосферного давления от высоты представлена в табл. 4.3.

Таблица 4.3

Высота, км	Давление, Па	Высота, км	Давление, Па
0,1	$9,2 \cdot 10^4$	30,0	$1,1 \cdot 10^3$
1,0	$8,8 \cdot 10^4$	100,0	$1,3 \cdot 10^2$
3,0	$6,8 \cdot 10^4$	2000,0	$1,3 \cdot 10^{-11}$
5,0	$5,0 \cdot 10^4$		

Понижение давления на ЭиВС оказывает двоякое воздействие непосредственно изменяет электрические характеристики и косвенно ухудшает условия охлаждения.

Пониженное давление оказывает влияние на изоляционные свойства воздуха, приводит к изменению емкости воздушных конденсаторов и характеристик других элементов, в которых воздух используется в качестве изолятора. При пониженном давлении легко возникает тлеющий разряд между проводниками, находящимися под высоким напряжением. При изменении высоты с 1000 до 1600 м величина пробивного напряжения воздуха уменьшается в четыре раза.

Глубокий вакуум, который свойственен для космических аппаратов, может вызвать сублимацию металлических и неметаллических материалов, испарение смазки, ухудшение теплопередачи. Помимо этого глубокий вакуум приводит к ухудшению трения и свариванию контактирующих поверхностей, на поверхностях диэлектриков накапливаются электрические заряды, что приводит к усилению поверхностных токов утечки.

Понижение давления ухудшает отвод тепла от элементов ЭиВС, что может привести к их перегреву, особенно на больших высотах, так как уже на высоте 6 км теплоемкость воздуха падает в два раза по сравнению с его теплоемкостью у земли.

В связи с этим необходимо соответствующее охлаждение аппаратуры, что следует учитывать при выборе размеров и состояния излучающей поверхности, герметизация аппаратуры, меры принудительного охлаждения.

Радиация. Радиация может быть *естественной* и *искусственной*.

Источниками естественной радиации являются: космическое излучение, распад естественных радиоактивных элементов, радиация радиационных поясов Земли и излучение Солнца.

Для наземной полевой ЭиВС основным источником естественной радиации следует считать Солнце, особенно его тепловое и ультрафиолетовое излучение.

Корпускулярное излучение Солнца и космическое излучение в значительной степени поглощается земной атмосферой, создавая совместно с распадом естественных радиоактивных элементов радиационный фон на поверхности Земли. Его уровень подвержен флуктуациям. Особенно сильные изменения радиационного фона возможны при вспышках солнечной активности.

Естественный радиационный фон практического воздействия на ЭиВС не оказывает.

Как уже отмечалось, тепловое излучение Солнца ухудшает условия охлаждения ЭиВС и может способствовать ее местному или общему перегреву.

Воздействие ультрафиолетового излучения, хотя и значительно ослабленного атмосферой, приводит к активизации физико-химических процессов старения, в результате чего ускоряются окислительные процессы и распад многих органических диэлектриков, разрушаются лакокрасочные покрытия, ускоряется коррозия некоторых металлов.

Степень воздействия на элементы ЭИВС определяется видом радиации и условиями воздействия. Наиболее сильно подвержены воздействию искусственной радиации элементы ЭИВС, использующие органические и полупроводниковые материалы. Воздействие радиации также зависит от технологии изготовления элементов ЭИВС. Так, планарные транзисторы более стойки к радиации, чем транзисторы с мезоструктурой, а тонкопленочные транзисторы на 2-3 порядка более стойки, чем монокристаллические.

При облучении быстрыми нейтронами нарушается структура материала, повышается его температура, а в результате захвата нейтронов образуются примеси других элементов.

Облучение электронами и протонами на структуру вещества практически не влияет, но вызывает ионизацию. При облучении вещества электронами большой энергии может возникнуть жесткое рентгеновское излучение. При облучении гамма-лучами могут активизироваться некоторые реакции внутри вещества.

Под воздействием такого рода радиации в материалах ЭИВС могут происходить необратимые изменения, временно необратимые, исчезающие по истечении некоторого времени после прекращения облучения, и обратимые.

Чистота воздуха. На надежность ЭИВС заметное влияние оказывает загрязненность воздуха механическими и химическими примесями.

Находящаяся в воздухе пыль представляет собой мельчайшие частицы горных пород, почвы, дыма промышленных предприятий, остатки растительных и животных организмов. В воздухе в зависимости от степени его загрязнения может содержаться до 60 мг/м^3 пыли.

Находящаяся в атмосфере пыль, легко проникает в негерметизированную ЭИВС, снижая поверхностное сопротивление, ускоряя износ движущихся частей, контактов, изменяя, в ряде случаев, параметры элементов.

Особенно сильно пыль ухудшает характеристики аппаратуры, выполненной на печатном монтаже, не защищенном специальным покрытием, так как она образует токопроводящие перемычки между проводниками. С целью предохранения печатных плат от воздействия пыли и влаги их покрывают прочной изоляционной пленкой.

Увлажнение пыли усиливает ее воздействие на электрические параметры ЭИВС. Так поверхностное сопротивление неочищенной поверхности ультрафарфора при влажности 0% - $1 \cdot 10^{16}$ Ом, а той же поверхности при 100% влажности - $1 \cdot 10^9$ Ом.

Немаловажно и то, что осевшая пыль в определенных условиях ускоряет воздействие биологических факторов.

Более крупные механические частицы размером до 0,8 мм (песок) разрушают защитные покрытия, подшипники и другие элементы.

Кроме пыли в атмосфере могут быть сильнодействующие химические примеси, выбрасываемые промышленными предприятиями и различного рода машинами (соли, окислы, кислоты и т. п.). Так, сернистый газ содержится в выхлопных газах автомашин, газах металлургических, и химических предприятий. Окислы азота и хлор содержатся в газах ряда химических предприятий. Они увеличивают коррозию металлов, ускоряют процесс старения в пластмассах и органических диэлектриках. Степень влияния этих примесей значительно увеличивается во влажном воздухе.

Особенно влияют на надежность ЭИВС соли и соленые туманы на море и морском побережье. Высокая влажность атмосферы и насыщенность ее солями существенно убыстряют процесс появления отказов. Для уменьшения влияния этих факторов необходимо применять герметизацию элементов и аппаратуры в целом, специальные влаго- и солестойкие покрытия. В случаях принудительного охлаждения аппаратуры - противопылевые фильтры или замкнутую систему охлаждения.

Механические нагрузки. Механические нагрузки вызываются ударами и вибрациями при транспортировке, при воздействии ветра, аэродинамическими воздействиями и т. п.

Удары и вибрации могут привести к нарушению целостности паек, контактов, разрушению электронных элементов, крепежных деталей, нарушениям регулировок.

Механические воздействия определяются в единицах силы тяжести.

Ударное ускорение

$$g = \frac{v^2}{2 \cdot 9,81s}, \quad (4.41)$$

где g - ускорение силы тяжести;

v - мгновенная скорость в момент удара, см/с;

s - перемещение при ударе или суммарная величина упругих и остаточных деформаций ударяющихся предметов, мм.

Ускорение при вибрациях определяется по выражению

$$g = \frac{4\pi^2 f^2 s}{9,810}, \quad (4.42)$$

где f - частота колебаний, гц;

s - амплитуда перемещений, мм.

В табл. 4.4 приведены характеристики по вибрациям и перегрузкам различных видов перевозок [3, 8]

Таблица 4.4

Вид перевозок	Вибрации, Рц	Перегрузки, г	Значения частот, соответствующих максимуму перегрузок, Гц
Морские	0-30	1	10-30
Железнодорожные	1,5-400	2	2-8, 30-400
Автомобильные	0-200	4-5	2-3, 20-150
Авиационные	5-500	20	150-300
Аппаратура в ракетах	30-2000	10-70	

Практика показывает, что наиболее опасными являются вибрации с частотами 15-150 и 175-500 Гц. Первому диапазону частот соответствуют резонансные явления в конструкциях аппаратуры, а второму - резонансные явления в электронных элементах, которые могут, привести к разрушению спаев стекла с металлом, повредить слюдяные изоляторы, изменить межэлектродные расстояния и т. п.

Механические повреждения аппаратуры может вызвать и обслуживающий персонал при недостаточной квалификации и небрежном обращении с ней.

Правильный выбор амортизационных устройств, соответствующее размещение и крепление элементов ЭИВС, правильный выбор схем позволяют снизить на 90% число отказов, связанных с механическими воздействиями.

Биологические факторы. Под биологическими факторами понимают воздействие на ЭИВС живых организмов, т. е. влияние грибковых образований, насекомых, грызунов и т. п.

Грибковые образования могут значительно снизить надежность. Как правило, они возникают во влажной атмосфере на деталях из органических материалов, питаюсь продуктами их разложения. При наличии пыли грибковые образования развиваются значительно интенсивнее и могут развиваться на любом материале. Наиболее благоприятными для их развития считаются повышенная влажность, и температура 25-35° С. Рост плесени прекращается при температуре ниже 7° С.

Грибковые образования снижают поверхностное сопротивление изоляторов, образуют проводящие перемычки между проводниками, разрушают металлические и неметаллические детали за счет воздействия выделяемых кислот. Наиболее сильно страдают от плесени изделия из натуральных волокнистых материалов (хлопок, лен и т. п.).

Насекомые и грызуны реже воздействуют на ЭИВС, но такие случаи на практике встречаются. Насекомые и грызуны разрушают оболочки кабелей, мягкие пластмассовые покрытия, деревянные детали, приводят к замыканиям контактов, разъемов, кабелей. По данным литературы, до 0,5% отказов обусловлено воздействием биологических факторов. Для уменьшения вредного воздействия насекомых и грызунов применяют пластмассы со специальными добавками отпугивающего или отравляющего действия.

Действия обслуживающего персонала. С позиций эргономики ошибки оператора в системе человек-машина приводят к частичному или полному невыполнению задачи ЭИВС.

Влияние действий обслуживающего персонала в ряде случаев бывает более значительным, чем всех остальных факторов. Так, по американским данным, до 30% отказов аппаратуры является следствием недостаточной квалификации обслуживающего персонала. Исследования показали, что при хорошей подготовке операторов и правильной организации эксплуатации аппаратуры надежность в 3- 5 раз выше, чем при плохой организации и низкой подготовке операторов.

Среди факторов, определяющих степень влияния обслуживающего персонала при эксплуатации на надежность ЭИВС, необходимо отметить:

- а) квалификацию обслуживающего персонала;
- б) соблюдение правил технической эксплуатации;

в) степень организованности системы технического обслуживания. Одним из основных факторов является квалификация обслуживающего персонала. Под этим термином в дальнейшем будем понимать степень подготовленности обслуживающего персонала, которая определяется знанием устройства и назначения аппаратуры, условий и правил ее эксплуатации, умением поддерживать ее в исправном состоянии, предупреждать появление некоторых отказов, устранять появившиеся отказы, правильно организовать работу по эффективному использованию ее по назначению. Так, при слабо подготовленных операторах количество отказов аппаратуры в первые сутки после проведения регламентных работ в 8-10 раз превышает число отказов за сутки перед регламентными работами. Это объясняется неумением обслуживать ЭИВС, неумением обнаружить неисправности, неправильными действиями, вызывающими появление новых неисправностей. Естественно, что хорошо подготовленный персонал может обеспечить эксплуатацию ЭИВС с меньшими затратами сил и средств.

Недостаточная квалификация обслуживающего персонала может быть в, некоторой степени компенсирована автоматизацией контроля работоспособности и процесса поиска неисправностей, уменьшением числа регулировок и т. п.

Несмотря на это, вопросу подготовки обслуживающего персонала должно уделяться первостепенное значение особенно для сложных систем ЭИВС.

Строгое соблюдение правил технической эксплуатации способствует содержанию ЭИВС в исправном состоянии, так как эти правила предусматривают именно такие действия обслуживающего персонала, которые лучше обеспечивают эксплуатацию данной аппаратуры.

Степень организованности системы технического обслуживания определяет лучшие методы и формы организации эксплуатации ЭИВС, при которых обеспечивается высокая безотказность и долговечность аппаратуры. Она предусматривает, организацию ряда мероприятий (профилактика, ремонт, снабжение, запасными деталями, и т. п.), направленных на обеспечение эксплуатации с наиболее высоким значением коэффициента готовности.

Следует отметить, что улучшению эксплуатации способствует надежная сборка и обработка данных эксплуатации ЭИВС. Полученные в результате анализа статистических данных эксплуатации результаты помогают лучше организовать систему технического обслуживания, обеспечение запасными деталями и прогнозировать возможные отказы. Эти результаты также полезны и при разработке новой аппаратуры, так как помогают заранее учесть особенности эксплуатации и недостатки предыдущих разработок.

В процессе эксплуатации на ЭИВС, с той или иной степени действуют все факторы, которые должны правильно учитываться обслуживающим персоналом.

4.8. Сведения о законах распределения времени безотказной работы ЭИВС

На поведение ЭИВС и его элементов в процессе эксплуатации оказывают влияние многочисленные внешние и внутренние факторы. Они являются причиной по-

явления отказов. Последние, например, могут возникать вследствие воздействия внешних нагрузок, влаги, температуры, нестабильности питающих напряжений из-за отклонения определенных параметров за пределы допусков и т.п.

Отказы, особенно на ранних стадиях эксплуатации, могут возникать из-за недостатков в проектировании, изготовлении, а также нарушении правил эксплуатации. Различные материалы и элементы, используемые в ЭИВС вызывают многообразные формы влияния рассмотренных факторов на возникновение отказа и следовательно, на распределение времени безотказной работы. Из большого количества существующих законов распределения случайных величин необходимо использовать те, которые наиболее полно описывают интересующие нас распределения времени безотказной работы. Основным критерием для этого должен быть анализ зависимостей между механизмом отказов, учитывающим физику реальных процессов при эксплуатации, и функцией интенсивности отказов. Время безотказной работы есть непрерывная случайная величина, и для описания ее распределения в теории надежности используются следующие законы: экспоненциальный, Вейбулла, нормальный, логарифмически нормальный.

Для экспоненциальной модели распределения плотность распределения времени до отказа описывается выражением

$$f(t) = \lambda \cdot e^{-\lambda t}, \text{ при } \lambda > 0, t \geq 0, \quad (4.43)$$

где λ – параметр модели распределения.

В теории и практике надежности ЭИВС часто употребляют термин «экспоненциальный закон надежности», имея ввиду, что время до отказа распределено по экспоненциальной модели.

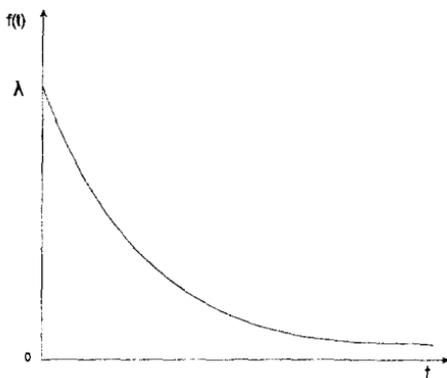


Рис. 4.5. Экспоненциальное распределение времени до отказа

Это распределение типично для большинства сложных объектов ЭИВС, содержащих большое количество различных невосстанавливаемых элементов, имеющих преимущественно внезапные отказы, когда явление износа и старения выражены слабо. Экспоненциальное распределение также применяется к восстанавливаемым

объектам с простейшим потоком отказов, а также в ряде случаев для приближенной оценки безотказности.

Зависимость показателей безотказности от времени в случае экспоненциального закона предстали на рис. 4.5.

Распределение Вейбулла. Функция плотности распределения времени до отказа описывается выражением

$$f(t) = \rho \cdot \beta \cdot t^{\beta-1} \cdot e^{-\rho \cdot t^\beta}, \quad (4.44)$$

где ρ и β - параметры закона распределения.

Параметр β называют коэффициентом формы. От значения коэффициента β во многом зависит график функции $f(t)$.

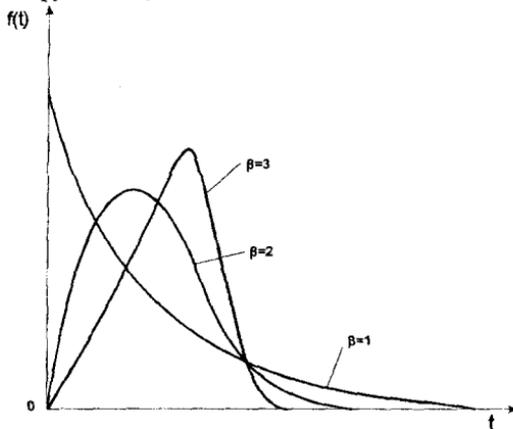


Рис. 4.6. Показатели безотказности при распределении времени безотказной работы по закону Вейбулла (при $\beta > 1$)

При значении $\beta = 1$ имеем дело с чисто экспоненциальным распределением, оно является частным случаем модели Вейбулла. При $\beta = 2-3$ распределение Вейбулла в значительной степени приближается к нормальному распределению.

Для нормальной модели плотность распределения времени до отказа описывается выражением

$$f(t) = \frac{1}{\sigma_t \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(t-t_{cp})^2}{2\sigma_t^2}}, \quad (4.45)$$

где t_{cp} , σ_t - параметры модели распределения,

t_{cp} - среднее время безотказной работы,

σ_t - среднее квадратичное отклонение времени безотказной работы.

В случае нормальной модели распределения можно говорить об усеченном распределении, так как область отрицательных значений времени до отказа отбрасывают (отсекают) как неимеющую физического смысла. График распределения времени до отказа по нормальному закону показан на рис. 4.7.

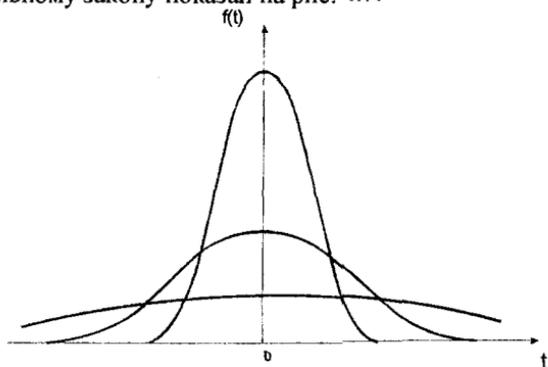


Рис. 4.7. График распределения времени до отказа по нормальному закону

Нормальный закон распределения описывает поведение объектов, которым типичен износ, причем все отказы однородны по качеству и имеют малый разброс износа.

Время восстановления ремонтируемых объектов и суммарная наработка объекта до среднего (капитального) ремонта в ряде случаев могут быть также описаны нормальным законом.

Для логарифмически нормальной модели характерно то, что по нормальному закону распределено не время до отказа, а логарифм этого времени.

Помимо рассмотренных законов в некоторых случаях могут применяться и другие. Так, для объектов с отказами вследствие усталостного разрушения, а также для некоторых видов электровакуумных приборов применяют логарифмически нормальное распределение.

Применяемость того или иного закона также определяется временем эксплуатации объекта и ее этапом (согласно закону зависимости $\lambda(t) = f(t)$).

Исследования показали, что поведение многих сложных объектов ЭиВС на первом участке эксплуатации (рис. 4.6) достаточно хорошо описываются законом распределения Вейбулла с $\beta < 1$, на втором участке — экспоненциальным законом, а на третьем — распределением Релея с $\beta > 2$.

Так как основным участком нормальной эксплуатации является второй (рис. 4.6), то основным законом для расчетов безотказности следует считать экспоненциальный.

Следует упомянуть о распределении Пуассона, достаточно широко используемом в теории надежности. Распределение Пуассона описывает поведение дискретных случайных величин.

Интервалы времени между отказами в *пуассоновском потоке* отказов взаимонезависимы и распределены по экспоненциальному закону, т.е. пуассоновский поток удовлетворяет свойствам ординарности и отсутствия последствий.

ГЛАВА 5. Расчет надежности

5.1. Методы расчета надежности

Под расчетом надежности будем понимать определение числовых значений показателей надежности по тем или иным исходным данным. Определенные значения показателей надежности позволяют оценить эксплуатационные свойства объекта ЭиВС на этапе его проектирования или эксплуатации. Это помогает сделать вывод об их соответствии заданным значениями при необходимости принять меры к повышению надежности.

Как правило, расчет надежности сводится к определению показателей безотказности и, что значительно реже, показателей других составляющих надежности.

Сущность расчета сводится к определению основных показателей надежности ЭиВС по известным показателям надежности ее элементов. Соответствующие показатели комплектующих элементов берутся на основании справочных данных или результатов эксплуатации и специально планируемых экспериментов.

При рассмотрении методов расчета безотказности будем полагать, что никаких предварительных мер по ее повышению не принято, используемые элементы типовые и соединены между собой последовательно.

Рассмотрим случай произвольного закона распределения времени безотказной работы. Найдем связь между показателями безотказности объекта и показателями безотказности комплектующих его элементов.

Для оценки безотказности одного элемента можно воспользоваться выражением (4.20). Оно позволяет определить вероятность безотказной работы элемента по известной интенсивности отказов данного типа.

Считая первичные отказы элементов данного объекта событиями независимыми, для вероятности безотказной работы всего объекта можно записать

$$P(t) = p_1(t) \cdot p_2(t) \cdot \dots \cdot p_n(t) = \prod_{i=1}^n p_i(t) \quad (5.1)$$

где $p_i(t)$ - вероятность безотказной работы i -го элемента.

С учетом выражения (4.26) выражение (5.1) примет вид

$$P(t) = \prod_{i=1}^n e^{-\int_0^t \lambda_i(t) dt} = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt} \quad (5.2)$$

Так как любой объект ЭиВС состоит из нескольких групп однотипных элементов с примерно одинаковыми показателями безотказности, то для каждой группы из n_i элементов справедливо выражение (5.2), а для всего объекта

$$\lambda(t) = \sum_{i=1}^k -n_i \lambda_i(t), \quad (5.3)$$

где k - количество групп элементов, образующих данный объект.

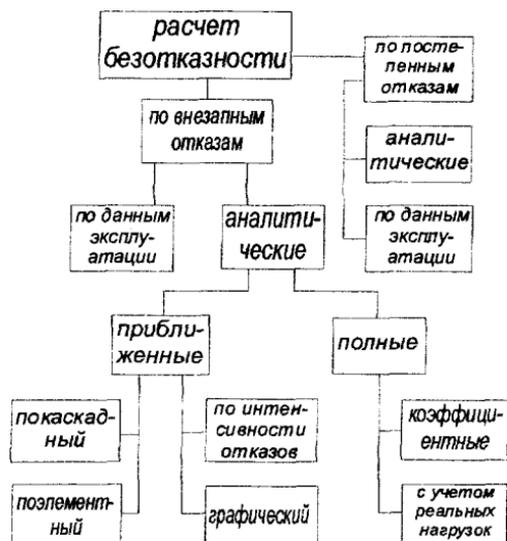


Рис. 5.1. Классификация методов расчета безотказности

С учетом выражения (5.3) выражение (5.2) можно записать

$$P(t) = e^{-\sum_{i=1}^k n_i \int_0^t \lambda_i(t) dt} \quad (5.4)$$

Анализ полученного выражения позволяет сделать следующие выводы:

а) безотказность объекта будет тем ниже, чем больше элементов входит в его состав (больше n или k);

б) вероятность безотказной работы объекта будет всегда ниже вероятности безотказной работы самого ненадежного элемента.

Наибольший интерес представляет расчет надежности для участка нормальной эксплуатации, где справедлив экспоненциальный закон распределения времени безотказной работы. Для этого случая

$$P(t) = e^{-\sum_{i=1}^k n_i \lambda_i(t)} = e^{-\lambda t} = e^{-t/T_0} \quad (5.5)$$

$$T_0 = 1 / \lambda; \quad \lambda = \sum_{i=1}^k n_i \lambda_i \quad (5.6)$$

В связи с различием в механизме возникновения внезапных и постепенных отказов, различают расчет надежности по внезапным и по постепенным отказам. В зависимости от типа исходных данных для расчета выбирают методы расчета по справочным данным или методы расчета по статистическим данным. В зависимости от полноты расчета также различают полный и ориентировочный расчеты надежности.

Так как в настоящее время разработано значительное количество методов расчета безотказности, то для удобства знакомства с ними на рис. 5.1 приведена их классификация.

5.2. Аналитические методы расчета безотказности

Для расчета безотказности объект необходимо представить в виде расчетной схемы. Независимо от сложности объекта ЭиВС и реальных связей комплектующих его элементов расчетная схема может быть представлена в виде последовательного соединения тех же элементов. Такая схема оценивает роль каждого элемента в потере работоспособности объектом. Показатели безотказности рассчитываются по ранее полученным выражениям.

В зависимости от полноты исходных данных различают ориентировочный и полный расчеты безотказности. Для приближенного расчета безотказности достаточно знание функциональной схемы объекта (до каскада). При полном расчете безотказности необходимо знание принципиальной схемы объекта (до элемента), характеристики элементов, их режимы работы и нагрузки, действующие на элемент.

Расчет безотказности по внезапным отказам. В качестве приближенных методов расчета безотказности могут быть использованы: *покаскадный, поэлементный, по интенсивностям отказов, графический*.

Покаскадный метод расчета дает оценку безотказности в первом приближении, применяют его на самых ранних этапах проектирования. В качестве исходных данных используются число каскадов в проектируемой аппаратуре и принадлежность ее к той или иной группе.

Расчет показателей надежности осуществляется с помощью выражений (5.2-5.6).

Поэлементный метод расчета позволяет получить более точную оценку безотказности, его применяют на последующих этапах проектирования. В качестве исходных данных используется: общее число элементов, комплектующих проектируемую ЭиВС, и их тип, а также данные эксплуатации аналогичного типа ЭС (по схемному использованию элементов и их нагрузкам).

Для оценки значения суммарной интенсивности отказов используют данные, полученные при эксплуатации аналогичной ЭиВС. Для этого случая справедливо

$$\lambda_{cp} = \frac{\lambda_{2,a}}{n_{2,a}} = \frac{\lambda_{n,a}}{n_{n,a}}, \quad (5.7)$$

где $\lambda_{2,a}$, $\lambda_{n,a}$ – суммарные интенсивности отказов соответственно эксплуатируемого аналога ЭИВС и проектируемой аппаратуры; $n_{2,a}$, $n_{n,a}$ – количество элементов соответственно эксплуатируемой и проектируемой ЭИВС.

Из выражения (5.7) следует

$$\lambda_{n,a} = \frac{n_{n,a}}{n_{2,a}} \lambda_{2,a} \quad (5.8)$$

Метод расчета по интенсивностям отказов позволяет достаточно полно оценить безотказность проектируемой аппаратуры. В качестве исходных данных используются: принципиальная схема ЭИВС, сведения о количестве групп и типов комплектующих элементов и их интенсивности отказов для легких и тяжелых условий применения.

Расчет показателей безотказности осуществляется с помощью выражений (5.2-5.6). Порядок проведения расчета следующий:

1) согласно принципиальной схеме и спецификации на нее производят разбивку всех элементов ЭИВС на группы, имеющие приблизительно одинаковые интенсивности отказов. Подсчитывают число элементов в каждой группе n_i ;

2) по справочным данным для используемых элементов находят максимальные и минимальные значения интенсивностей отказов – $\lambda_{i\max}$ и $\lambda_{i\min}$

3) определяют максимальные и минимальные групповые интенсивности отказов – $n_i \cdot \lambda_{i\max}$ и $n_i \cdot \lambda_{i\min}$;

4) определяют общую интенсивность отказов по выражению (5.6);

5) используя это же выражение, определяют вероятность безотказной работы и среднее время наработки до отказа, (расчет ведется для значений $\lambda_{i\max}$ и $\lambda_{i\min}$).

Графический метод расчета безотказности применяют, если известна зависимость интенсивности появления отказов от времени.

В этом случае расчет показателей безотказности также осуществляется с помощью выражения (5.2). Расчет суммарной интенсивности отказов объекта выполняют графически по известным зависимостям $\lambda = f(t)$. С этой целью производят суммирование ординат характеристики $\lambda_i(t)$ (рис. 5.2). Затем определяют площадь под кривой $\lambda(t)$:

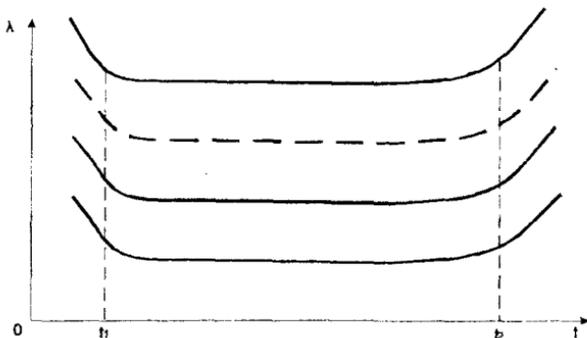


Рис. 5.2. К определению $\lambda_i(t)$

$$S_{\lambda} = \int_{t_1}^{t_2} \lambda(t) dt \quad (5.9)$$

Подсчитанное значение подставляют в выражение (5.2), которое примет вид

$$P(t) = e^{-\int_{t_1}^{t_2} \lambda(t) dt} = e^{-S_{\lambda}} \quad (5.10)$$

Полный расчет безотказности подразумевает учет режимов работы комплектующих объект элементов. В зависимости от полноты учета различают *коэффициентный метод* и *метод учета реальных нагрузок элементов*. Все перечисленные методы расчета предполагают наличие полных сведений об объекте ЭиВС и условиях его эксплуатации.

Коэффициентный метод позволяет получить достаточно полные и достоверные данные о коэффициентах надежности применяемых элементов. Коэффициентный метод предполагает наличие простейшего потока отказов. *Коэффициент надежности* представляет собой отношение интенсивности отказов элементов i -й группы λ_i при данных условиях эксплуатации к интенсивности отказов некоторого основного элемента (λ_0), количественные характеристики которого в достаточно близких условиях эксплуатации достоверно известны, т. е.

$$K_i = \lambda_i / \lambda_0 \quad (5.11)$$

Это выражение предполагает одинаковое влияние режимов работы, как на основной элемент, так и на все остальные.

При значительных различиях в условиях эксплуатации в значениях коэффициентов нагрузки использование соотношения (5.11) становится неправомочным. В качестве основного элемента, как правило, используют транзистор.

Расчет безотказности осуществляется с помощью выражений (5.2) - (5.6).

Используя выражение (5.11), выражение (5.6) можно записать λ в виде

$$\lambda = \lambda_0 \sum_{i=1}^k n_i K_i \quad (5.12)$$

Учет условий эксплуатации в коэффициентном методе осуществляется с помощью учета влияния этих условий на поведение основного элемента:

$$\lambda(z) = \lambda_0(z) \sum_{i=1}^k n_i K_i, \quad (5.13)$$

где $\lambda_0(z)$ – интенсивность отказов основного элемента с учетом влияния z -го фактора.

Для повышения достоверности и точности оценки безотказности необходимо значение коэффициентов K_i уточнять, согласуя их с реальной конструкцией ЭиВС; условиями ее эксплуатации и реальными режимами работы элементов.

Расчет безотказности целесообразно вести поблочно с целью выявления слабых мест данного типа ЭиВС.

Метод учета реальных нагрузок элементов позволяет получить результаты, наиболее близкие к действительности, так как в расчет вводится истинное значение интенсивностей отказов с учетом реальных режимов работы и воздействия соответствующих факторов.

В качестве исходных данных используют все имеющиеся данные об исследуемом объекте ЭиВС, а также зависимости интенсивностей отказов комплектующих его элементов от воздействия реально действующих в заданных условиях эксплуатации факторов, т. е. $\lambda_i(z)$. В этом случае выражение (5.6) примет вид

$$\lambda(z) = \sum_{i=1}^k \lambda_i(z) \quad (5.14)$$

В остальной части расчет не отличается от ранее описанного и производится по выражениям (5.2)-(5.6).

Расчет по постепенным отказам. Наряду с внезапными отказами, особенно для сложных объектов ЭиВС, характерно значительное количество постепенных отказов, особенно в период старения. Число таких отказов может достигать до 50% от общего числа всех отказов [7, 13]. Учет старения элементов особенно важен для ЭиВС с большим сроком хранения.

Основой расчета являются данные о закономерностях изменения определяющих параметров данного объекта во времени, а также установленные на них допуски.

ГЛАВА 6. Методы повышения эксплуатационной надежности

6.1. Общие методы повышения надежности

Как отмечалось выше, надежность ЭИВС зависит от множества факторов. Согласно классификации этих факторов (см. рис. 4.5) основными из них являются субъективные: ошибки разработки, ошибки производства и ошибки эксплуатации. В литературе приводится следующее распределение отказов: ошибки разработки - 40%, ошибки производства - 30% и ошибки эксплуатации - 30%.

Высокая надежность объекта на стадии проектирования обеспечивается за счет следующего:

- а) выбора схемных решений;
- б) выбора элементов, материалов и режимов их работы;
- в) выбора конструктивных решений;
- г) учета условий работы и опыта эксплуатации аналогичной аппаратуры;
- д) разработки мер по удобству технического обслуживания и эксплуатации;
- е) учета возможностей оператора и требований эргономики.

При выборе принципиальных схем ЭИВС предпочтение отдается наиболее простым схемам с наименьшим числом элементов схем, не требующим специального подбора элементов, имеющим минимальное число органов регулировки, схемам, устойчиво работающим в широком интервале воздействий дестабилизирующих факторов. Однако, полное удовлетворение всех этих условий невозможно и конструктору приходится искать компромиссные решения.

В проектируемой аппаратуре необходимо использовать элементы, надежность которых соответствует требованиям к надежности самой аппаратуры.

В связи с ростом объема и ответственности, решаемых ЭИВС задач, требования к надежности аппаратуры непрерывно растут. Это в свою очередь предъявляет все более высокие требования к надежности комплектующих элементов. Несмотря на достаточно высокое качество элементов, выпускаемых промышленностью, они не всегда отвечают предъявляемым требованиям. Так, средняя интенсивность отказов серийных элементов порядка $1 (10^{-5} - 10^{-6})$, 1/ч. Полагают, что путем дальнейшего совершенствования производства можно снизить интенсивность отказов до $1 \cdot 10^{-8}$, 1/ч. Это потребует существенной перестройки технологии, значительного времени и больших средств.

Поэтому перед конструктором остается задача обеспечения требуемой надежности ЭИВС без существенного изменения надежности ее элементов.

Важным фактором повышения надежности является правильный выбор режимов работы элементов.

Правильный выбор конструкционных материалов для ЭИВС также способствует повышению ее надежности. Применяемые материалы должны иметь такую скорость старения, которая обеспечивала бы нормальную эксплуатацию аппаратуры в течение всего срока службы и сохраняла бы требуемые механические и электрические характеристики.

Конструктивные решения прямо и косвенно влияют на надежность ЭиВС. Неудачное конструктивное решение может привести к преждевременному отказу. Крупноблочная конструкция технологически сложна и неудобна при ремонте, поэтому предпочтение необходимо отдавать модульной конструкции. Решая этот вопрос, следует находить оптимальное число блоков, так как при большом их количестве на надежность будут существенно влиять межблочные соединения, снижая ее надежность. Также важен правильный выбор монтажа. Например, печатный монтаж значительно надежнее, чем навесной, но он менее удобен в ремонте.

Конструктивные решения должны обеспечить и необходимые тепловые режимы элементов ЭиВС, требуемый микроклимат, безотказность в условиях, воздействия ударных и вибрационных нагрузок.

Конструктивные решения тесно связаны с последующей эксплуатацией и восстановлением аппаратуры. Поэтому при конструировании надо предусматривать контрольные гнезда, легкий доступ ко всем блокам аппаратуры, удобство контроля ее состояния и настройки, смены блоков, меры, обеспечивающие безопасность обслуживающего персонала и др.

Эргономика требует учета психофизиологических возможностей операторов и создания для них оптимальных условий. Органы управления и контроля должны располагаться таким образом, чтобы не утомляли зрения оператора, не вызывали излишних напряжений, не требовали больших физических усилий. При конструировании также надо учитывать скорость реагирования оператора и требуемый уровень подготовки.

На этом же этапе необходимо решать вопрос о резервировании и контроле работоспособности ЭиВС в процессе эксплуатации.

Не менее важным является обеспечение заданной надежности в процессе производства, которая достигается следующими мероприятиями:

- а) выбором соответствующей технологии и строгим ее соблюдением;
- б) внедрением автоматизации;
- в) входным контролем материалов и элементов;
- г) предварительной тренировкой элементов и аппаратуры;
- д) выбором методики настройки и налаживания аппаратуры;
- е) текущими и выходными контролями.

Правильный выбор технологии и строгое ее соблюдение, непрерывное ее совершенствование играют существенную роль в обеспечении необходимой надежности ЭиВС.

Особо важную роль играет автоматизация производства, так как позволяет получить наибольшую воспроизводимость параметров серийных ЭиВС. Автоматизация позволяет свести к минимуму влияние субъективных факторов на качество продукции.

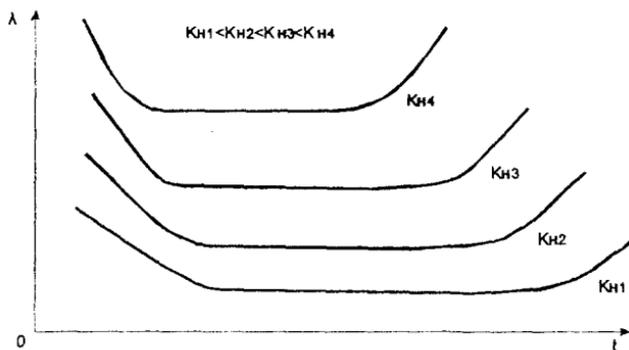


Рис. 6.1. Зависимости интенсивности отказов от коэффициента нагрузки

Входной контроль материалов и элементов не должен допускать в производство недоброкачественные материалы и элементы, имеющие отклонения от заданных требований.

Предварительная тренировка элементов и аппаратуры сокращает этап работки аппаратуры, позволяет оценить правильность выбранного коэффициента нагрузки, отбраковать малонадежные элементы. Особенно это полезно для аппаратуры одноразового применения. Элементы при тренировках ставят в более тяжелые условия, чем при нормальной эксплуатации. Режим выбирают на основе зависимостей интенсивности отказов от коэффициента нагрузки (рис. 6.1). Как следует из этого графика, с ростом коэффициента нагрузки кривые $\lambda = f(t)$ смещаются влево, а участок нормальной эксплуатации сокращается. Выбирая нужное значение коэффициента нагрузки, при тренировке создают необходимые условия для ускоренных испытаний элемента, соответствующие его длительной работе в аппаратуре.

Все описанные мероприятия позволяют уменьшить вероятность появления внезапных отказов.

В процессе настройки аппаратуры возникают постепенные отказы, обусловленные изменениями параметров элементов. Поэтому должны быть предусмотрены такие настройки и регулировка, при которых изменения параметров элементов не приводили бы к нарушению работоспособности.

В связи с тем, что изменяются параметры элементов, как правило, в одном направлении, регулировка по средним значениям параметров не всегда дает желаемые результаты. Поэтому характер регулировок должен тщательно продумываться на основании анализа выбранной схемы и предшествующего опыта эксплуатации.

На различных стадиях производства ЭиВС проводится *текущий контроль*, который позволяет выявить и не допустить некондиционные элементы и узлы на дальнейшую сборку, выявить отступления от принятой технологии. Испытания проводятся в условиях, наиболее близких к эксплуатационным, учитывается влияние различного рода вибраций, перегрузки, влажности и т.п.

Выходной контроль является окончательной проверкой ЭиВС после сборки и настройки.

Текущий и выходной контроль могут быть сплошными или выборочными (статистическими). Последний наименее трудоемкий и при правильной организации дает хорошие результаты.

К эксплуатационной группе относятся факторы, влияющие на надежность ЭиВС непосредственно в процессе эксплуатации. Они в свою очередь состоят из групп объективных факторов (влияние внешней среды и т. п.) и группы субъективных факторов, связанных с подготовкой обслуживающего персонала, организацией эксплуатации и т. п.

При соответствующей организации эксплуатации можно уменьшить влияние и другой группы факторов на надежность ЭиВС, что повысит значение $P(t)$ и увеличит наработку на отказ.

Для увеличения значения коэффициента готовности необходимо проводить мероприятия, способствующие:

- а) увеличению времени наработки на отказ;
- б) уменьшению времени простоя.

Следует отметить, что наиболее просто и с достаточным эффектом реализуются мероприятия второй группы. К ним необходимо отнести:

- а) повышение квалификации обслуживающего персонала;
- б) улучшение организации технического обслуживания;
- в) совершенствование технических средств обслуживания;
- г) прогнозирование постепенных отказов;
- д) уменьшение времени на отыскание и устранение отказов.

Повышение квалификации обслуживающего персонала, как уже отмечалось, в первую очередь предусматривает углубленное изучение конкретной ЭиВС, особенностей ее эксплуатации, опыта эксплуатации подобного типа аппаратуры и т. п. Это помогает сознательно эксплуатировать аппаратуру, наиболее эффективно проводить профилактические мероприятия, сокращать время на отыскание и устранение неисправностей.

Улучшение организации технического обслуживания предусматривает такую организацию, при которой минимальный расход сил и средств обеспечил бы наибольшее значение коэффициента готовности. Сюда входят вопросы подготовки обслуживающего персонала, планирование профилактических работ (с учетом рекомендаций теории надежности и опыта эксплуатации ЭиВС), обеспечение техническими средствами профилактических работ (различная диагностическая и профилактическая аппаратура), автоматизация контроля состояния ЭиВС, планирование запасных элементов и узлов и т. п.

Организация прогнозирования постепенных отказов позволяет повысить вероятность безотказной работы в течение времени эксплуатации.

Полагая постепенные и внезапные отказы взаимонезависимыми в соответствии с [5, 8], можно записать

$$K_{ГВ} = \frac{T_{P\Sigma B}}{T_{P\Sigma B} + T_{П\Sigma B}}; \quad K_{ГП} = \frac{T_{P\Sigma П}}{T_{P\Sigma П} + T_{П\Sigma П}}, \quad (6.1)$$

где $T_{P\Sigma B}$ и $T_{P\Sigma П}$ - общее время наработки объекта (элемента) соответственно между внезапными и постепенными отказами за некоторое время эксплуатации; $T_{П\Sigma B}$ и $T_{П\Sigma П}$ - общее время простоя объекта (элемента) соответственно из-за внезапных и постепенных отказов за то же время эксплуатации.

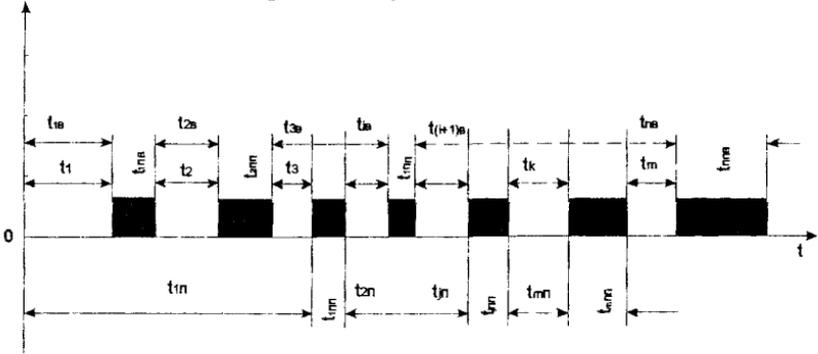


Рис. 6.2. Характеристика процесса с учетом внезапных и постепенных отказов

На рис. 6.2 приведена характеристика процесса эксплуатации некоторого объекта в течение определенного времени. За это время в объекте имело место M отказов, из них m постепенных и n внезапных. Для этого случая можно записать

$$T_{P\Sigma B} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_{iB} = \frac{1}{n} \left(\sum_{k=1}^M t_k + \sum_{j=1}^m t_{jI} \right);$$

$$T_{P\Sigma П} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m t_{iП} = \frac{1}{m} \left(\sum_{k=1}^M t_k + \sum_{i=1}^n t_{iП} \right), \quad (6.2)$$

Подставляя эти значения в выражение (6.1) и производя необходимые преобразования, можно записать

$$K_{ГВ} + K_{ГП} = \frac{MT}{MT + mT_{n\Sigma n} + nT_{П\Sigma B}} + 1 \quad (6.3)$$

Учитывая, что $K_{Г} = \frac{MT}{MT + mT_{n\Sigma n} + nT_{П\Sigma B}}$

есть общий коэффициент готовности, окончательно можно записать

$$K_{Г} = K_{ГВ} + K_{ГП} - 1 \quad (6.4)$$

Как следует из выражения (6.4), прогнозирование постепенных отказов позволяет увеличить значение общего коэффициента готовности объекта.

Так как значение коэффициента $K_{гв}$ главным образом определяется средним временем отыскания отказавших элементов, то основное внимание необходимо уделять облегчению поиска отказавшего элемента, а также прогнозированию возможных отказов (диагностике). Время отыскания отказавшего элемента может колебаться в значительных пределах - от нескольких минут до десятков часов. Прогнозирование отказов, программирование поиска отказавших элементов позволяют уменьшить это время в несколько раз.

Если учесть, что постепенные отказы составляют до 50% от общего числа отказов [3, 5], то можно считать, что $T_{гв} = T_{гд}$. С учетом этого выражения получим

$$K_{гв} = K_{гд} = 0,5 (1 + K_r) \quad (6.5)$$

Полагая для сложных ЭиВС значение $K_r = 0,5 - 0,9$, нетрудно получить для коэффициента готовности при прогнозировании постепенных отказов $K_{гд} = 0,75 - 0,95$.

Как видим, эксплуатационная группа факторов содержит ряд составляющих, способствующих повышению надежности ЭиВС, которые могут быть реализованы как в период проектирования и изготовления аппаратуры, так и в период ее непосредственной эксплуатации.

6.2. Общие сведения о резервировании

Среди методов повышения надежности особое место занимает использование избыточности, т. е. введение дополнительных средств или возможностей сверх минимально необходимых для выполнения объектом заданных функций. Сам же метод повышения надежности объекта путем введения избыточности принято называть резервированием.

Особое место, отводимое этому методу, объясняется тем, что резервирование наиболее полно позволяет решить задачу получения требуемой надежности ЭиВС при относительно малонадежных элементах. Иногда и в процессе эксплуатации может быть предусмотрен резерв в виде отдельных блоков или систем для повышения надежности всего объекта. Следует учитывать, что резервирование связано с возрастанием веса, габаритов, стоимости аппаратуры и в ряде случаев потребляемой мощности электропитания.

Классификация существующих методов резервирования представлена на рис.6.3.

В зависимости от типа создаваемой в объекте ЭиВС избыточности, различают резервирование:

структурное, которое предусматривает использование избыточных элементов в структуре объекта (введением дополнительных узлов, блоков и элементов аналогичных имеющимся);

временное, когда используется избыточное время, которое может быть при соответствующей структуре времени в информации, поступающей на объект;

информационное, которое предполагает использование избыточности информации, поступающей, на объект;

функциональное, означающее использование способности элементов и узлов объекта выполнять дополнительные функции;

нагрузочные, предусматривающее использование способности объекта и его элементов воспринимать дополнительную нагрузку.

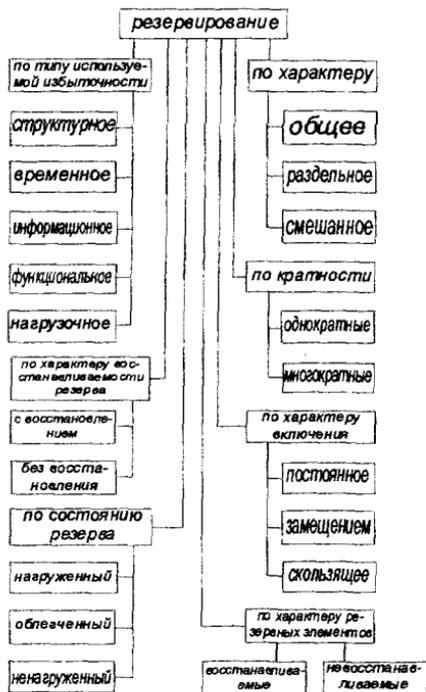


Рис. 6.3 Классификация резервирования

В дальнейшем будем рассматривать лишь структурное резервирование, так как остальные виды относятся к специфическим условиям эксплуатации ЭИВС. Следует отметить, что в ряде случаев в объекте могут быть использованы несколько видов резервирования одновременно (структурное и нагрузочное, структурное и временное и т. п.).

Говоря о структурном резервировании, следует различать *основной элемент*, т. е. элемент структуры объекта, минимально необходимый для выполнения объектом заданных функций, и *резервный*, т. е. элемент, предназначенный для обеспечения работоспособности объекта в случае отказа основного элемента. Естественно,

что резервный элемент должен обладать характеристиками, аналогичными основному.

Следует также указать на то, что в качестве резервного элемента может выступать как комплекующий объект элемент, так и сам объект. В соответствии с этим различают резервирование:

1) *общее*, предусматривающее резервирование объекта в целом. В данном случае резервирующим элементом является аналогичный объект ЭиВС;

2) *раздельное*, предусматривающее резервирование отдельных элементов объекта или их групп. В этом случае резервирующим элементом является аналогичный элемент комплекующий - объект или же их группа;

3) *смешанное*, предусматривающее совмещение различных видов резервирования.

Отношение числа резервных элементов к числу резервируемых основных элементов объекта носит наименование *кратность резервирования*. Различают однократное резервирование, кратность которого равна единице, и многократное, кратность которого больше единицы. Многократное резервирование применяют в тех случаях, когда необходимо обеспечить весьма высокие показатели надежности.

Присоединение резервных элементов к основным должно производиться параллельно. Определим безотказность объекта, состоящего из m параллельно соединенных элементов. Вероятность появления общего отказа

$$Q = q_1 \cdot q_2 \cdot \dots \cdot q_i \cdot \dots \cdot q_m = \prod_{i=1}^m q_i, \quad (6.6)$$

где q_i - вероятность появления отказа i -го элемента.

Вероятность безотказной работы

$$P = 1 - Q = 1 - \prod_{i=1}^m q_i = 1 - \prod_{i=1}^m (1 - p_i) \quad (6.7)$$

Если объект (элемент) состоит из K групп однотипных элементов, то выражение (6.7) принимает вид

$$P = 1 - \prod_{i=1}^K (1 - p_i)^{m_i} \quad (6.8)$$

Из полученных выражений следует, что безотказность параллельно соединенных объектов (элементов) всегда будет выше безотказности одного объекта (элемента).

Выбирая соответствующее количество параллельных ветвей, можно с помощью относительно малонадежных элементов обеспечить высокую надежность объекта.

На рис. 6.4 приведена зависимость вероятности безотказной работы резервируемого объекта от количества параллельно включенных ветвей.

Определим безотказность объекта при общем резервировании (рис. 6.5). Воспользовавшись выражением (6.7) для случая, представленного на рис. 6.4, можно записать

$$P_{\text{общ}} = 1 - \prod_{i=1}^m (1 - p_i), \quad (6.9)$$

где p_i - вероятность безотказной работы i -го резервирующего объекта.

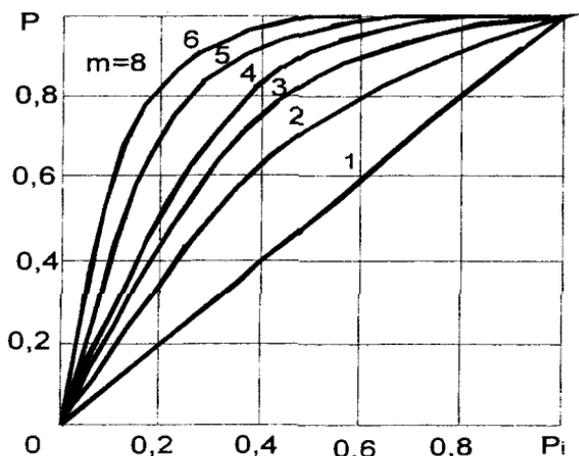


Рис. 6.4. Зависимость вероятности безотказной работы, резервируемого элемента от количества параллельно включенных ветвей

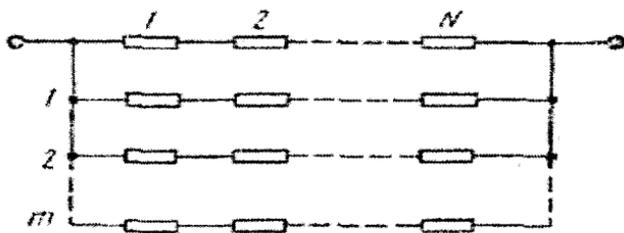


Рис. 6.5. Схема общего резервирования

Для одного объекта, состоящего из N последовательно соединенных элементов, можно записать

$$P_i = \prod_{j=1}^N p_j \quad (6.10)$$

С учетом выражения (6.10) выражение (6.9) примет вид

$$P_{\text{общ}} = 1 - \prod_{i=1}^m \left(1 - \prod_{j=1}^N p_j \right) = 1 - \prod_{i=1}^m \left\{ 1 - \prod_{j=1}^N (1 - q_j) \right\} \quad (6.11)$$

Для случая равнонадежных элементов выражение (6.11) можно записать в виде

$$P_{\text{общ}} = 1 - \left[1 - (1 - q)^N \right]^m \quad (6.12)$$

Из полученных выражений следует, что *вероятность безотказной работы системы с общим резервированием при бесконечном числе последовательно соединенных элементов в ветви уменьшается до нуля даже в том случае, когда число параллельных ветвей увеличивается до бесконечности.*

Случай раздельного резервирования представлен на рис. 6.6. В данном случае для отдельной группы из m параллельно включенных элементов может быть применено выражение (6.7):

$$P = 1 - \prod_{i=1}^m q_i = 1 - \prod_{i=1}^m (1 - p_i) \quad (6.13)$$

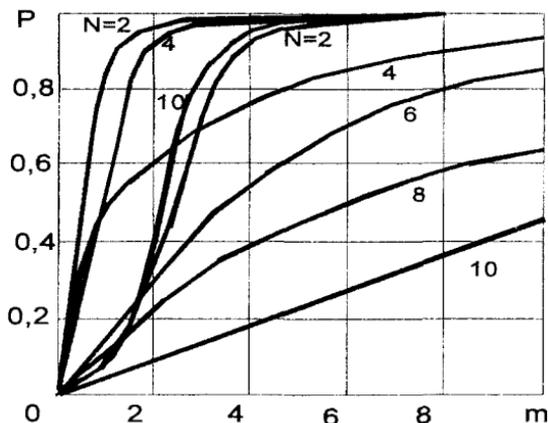


Рис. 6.6. Зависимость вероятности безотказной работы объекта при общем и раздельном резервировании, от значений m и N

Для вероятности безотказной работы всего объекта с раздельным резервированием справедливо

$$P_{\text{раз}} = \prod_{j=1}^N p_j = \prod_{j=1}^N \left[1 - \prod_{i=1}^m (1 - p_i) \right] = \prod_{j=1}^N \left(1 - \prod_{i=1}^m q_i \right) \quad (6.14)$$

или для случая равнонадежных элементов

$$P_{раз} = [1 - (1 - p)^m]^N = (1 - q^m)^N. \quad (6.15)$$

Из полученного выражения (6.15) следует, что *вероятность безотказной работы приближается к единице при безграничном увеличении числа резервируемых элементов в группах, даже если число последовательно соединенных групп также приближается к бесконечности* (на рис. 6.6 сплошные линии), т. е. *раздельное резервирование обладает определенным преимуществом перед общим в смысле повышения надежности.*

Для смешанного резервирования, зная число последовательно включенных резервируемых групп — N и число параллельных резервных цепей в каждой группе — m , пользуясь выражениями (6.13) и (6.15), можно оценить вероятность безотказной работы. Сравнивая между собой различные системы резервирования, нетрудно прийти к выводу, что при общем резервировании для полного отказа объекта достаточно, чтобы в каждой из цепей вышло из строя по одному элементу. При раздельном и смешанном резервировании отказ объекта происходит только в том случае, если в каждой группе выйдут из строя все элементы. Естественно, что вероятность этого события мала.

Для количественного сравнения с целью получения более простых выражений будем полагать, что все элементы данного объекта равнонадежны.

Воспользовавшись выражениями (6.13) и (6.15), запишем для вероятности появления отказа

$$\begin{aligned} Q_{общ} &= [1 - (1 - q)^N]^m; \\ Q_{раз} &= 1 - (1 - q^m)^N \end{aligned} \quad (6.16)$$

Раскладывая правые части равенства (6.16) в степенной ряд и учитывая, что при нормальной эксплуатации $q \ll 1$ получим упрощенные выражения:

$$\begin{aligned} Q_{общ} &\approx N^m q^m; \\ Q_{раз} &\approx Nq^m \end{aligned} \quad (6.17)$$

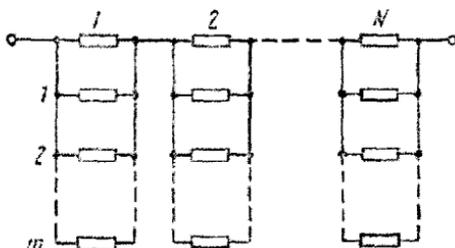


Рис. 6.7. Схема раздельного резервирования

Окончательно для количественной оценки способов резервирования можно записать

$$Q_{\text{общ}} / Q_{\text{раз}} = N^m q^m / Nq^m = N^{m-1} \quad (6.18)$$

Из полученного выражения следует, что раздельное резервирование дает выигрыш в безотказности. Это наглядно видно на рис. 6.6 если сравнить ход кривых при одинаковых значениях m и N .

В практике может возникнуть задача, обратная рассмотренным: известна вероятность безотказной работы одной ветви P , нужно найти число параллельных ветвей m .

Для случая общего резервирования воспользуемся выражением (6.13)

$$P_{\text{общ}} = 1 - [1 - (1 - q)^N]^m$$

Для случая раздельного резервирования воспользуемся выражением (6.15)

$$P_{\text{раз}}^{1/N} = 1 - (1 - p)^{m_{\text{раз}}}$$

Логарифмируя правую и левую части равенства, получим

$$m_{\text{раз}} = \frac{\lg(1 - P_{\text{раз}}^{1/N})}{\lg(1 - p)} \quad (6.19)$$

В заключение отметим, что резервирование может быть с восстановлением любого основного и резервного элемента в процессе эксплуатации объекта, так называемое *резервирование с восстановлением*, и без восстановления элементов, так называемое *резервирование без восстановления*. Сам резервный элемент может быть восстанавливаемым, т. е. в случае его отказа подлежит восстановлению, и невосстанавливаемым.

6.3. Способы включения резерва

Существуют три способа включения резерва: *постоянное, замещением и скользящее* (см. рис. 6.8).

Постоянным резервированием называют такое, при котором резервные элементы участвуют в функционировании объекта наравне с основными. Естественно, что резервные элементы находятся в таком же режиме, как и основные, и их ресурс работы расходуется с момента включения на работу всего объекта. Так как резервные элементы функционируют наравне с основными, т.е. работают под нагрузкой, то такой резерв называют *нагруженным*.

Основными достоинствами постоянного резервирования являются: простота включения и мгновенная готовность резерва к работе, так как нет необходимости в подключении резерва вместо основного объекта (элемента).

Недостаток постоянного резервирования заключается в том, что с появлением отказов в резерве изменяются параметры всей системы, а это в ряде случаев может привести к изменению режимов работы. Безотказность системы с постоянным резервированием может быть определена с помощью выражений (6.9) и (6.12).

Резервирование, при котором функции основного элемента передаются резервному только после отказа основного элемента, называют *резервированием замещением*.

При резервировании замещением обязательно наличие коммутирующего устройства для подключения резервных элементов взамен отказавших основных элементов.

Резервирующие элементы могут находиться в различных режимах: *нагруженном, облеглаченном и ненагруженном*.

Нагруженный резерв (как и при постоянном резервировании) имеет резервные элементы, находящиеся в том же режиме, что и основные элементы. Это позволяет предельно сократить время перехода резервного элемента в рабочее состояние.

Облеглаченный резерв имеет резервные элементы, находящиеся в менее нагруженном режиме нежели основные. Ресурс работы резервных элементов расходуется с момента включения объекта в работу, но интенсивность расхода до подключения значительно ниже, чем у основных элементов. Поэтому закон распределения времени их безотказной работы несколько отличен от распределения времени безотказной работы основных элементов.

Время перехода, резервных элементов в рабочее состояние больше, чем при нагруженном резерве.

Ненагруженный резерв имеет резервные элементы, практически не несущие нагрузок. Ресурс работы ненагруженного резерва начинает расходоваться только с момента его включения. Закон распределения времени безотказной работы резервных элементов такой же, как и у аналогичных типов элементов в режиме хранения. Время перехода резервных элементов в рабочее состояние наибольшее.

Преимущество резервирования замещением состоит в том, что в большей степени может сохраняться ресурс работы резервных элементов (облеглаченный и ненагруженный резервы), не изменяются режимы работы объекта (элементов) при отказах, отпадает необходимость в специальных регулировках при отказах, появляется возможность использовать один резервный элемент для резервирования нескольких однотипных основных элементов.

К недостаткам нужно отнести: необходимость коммутирующего устройства для подключения резерва, дополнительного времени на переключение резерва и выход его на режим (облеглаченный и ненагруженный резервы).

Включение резервных элементов может осуществляться вручную или автоматически (автоматическое резервирование).

Представляет практический интерес учет влияния надежности коммутирующего устройства на общую надежность резервированной системы (рис. 6.8). Будем пола-

гать отказы коммутирующего устройства и цепей независимыми. Для этого случая справедливо

$$P_{p.o} = P_{рез} P_k, \quad (6.20)$$

где $P_{рез}$ - вероятность безотказной работы цепей резервирования; P_k - вероятность безотказной работы коммутирующего устройства. Воспользовавшись выражением (6.20), для случая общего резервирования можно записать

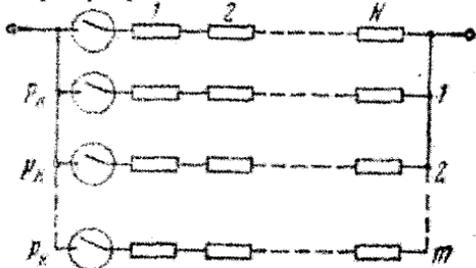


Рис. 6.8. Схема реализации ненагруженного резерва

$$P_{p.o.общ} = 1 - \prod_{i=1}^m (1 - P_k \prod_{j=1}^N p_j) = 1 - \prod_{i=1}^m \left[1 - (1 - Q_k) \prod_{j=1}^N (1 - q_j) \right] \quad (6.21)$$

Для случая раздельного резервирования выражение примет вид

$$P_{p.o.раз} = \prod_{j=1}^N P_j = \prod_{i=1}^N \left[1 - \prod_{i=1}^m (1 - P_k p_i) \right] = \prod_{j=1}^N \left\{ 1 - \prod_{i=1}^m [1 - (1 - Q_k)(1 - q_i)] \right\}, \quad (6.22)$$

где

$$P_j = 1 - \prod_{i=1}^m (1 - P_k p_i) \quad (6.23)$$

При выводе выражений (6.21) и (6.22) предполагалось, что коммутирующие устройства есть во всех цепях и они все равнонадежны.

Сравнивая два способа резервирования (общее и раздельное), нетрудно прийти к выводу, что при раздельном резервировании понадобится большее количество коммутирующих устройств. В то же время раздельное резервирование позволяет получить существенные преимущества в повышении безотказности по сравнению с общим резервированием, позволяет применять более гибкие и экономичные схемы резервирования с использованием устройств для анализа отказов и выбора резерва.

Вследствие этого возникают определенные требования к надежности коммутирующих устройств, так как их низкая надежность может существенно повлиять на надежность всего объекта. Очевидно, что раздельное резервирование замещением будет только тогда оправданным, когда надежность, таким образом резервированно-

го объекта будет не ниже надежности объекта с общим резервированием, т. е. должно выполняться неравенство

$$P_{раз} > P_{общ} \quad (6.24)$$

Будем полагать худший случай, когда в системе общего резервирования вероятность безотказной работы коммутирующего устройства равна единице, а в объекте с отдельным резервированием P_k . Для этого случая неравенство (6.24) с учетом выражений (6.21) и (6.22) можно записать

$$\left[1 - (1 - P_k P)^n\right]^N > 1 - \left[1 - (1 - q)^N\right]^m \quad (6.25)$$

При малых $q \ll 1$ неравенство (6.24) примет вид

$$\left[1 - (1 - P_k P)^m\right]^N > 1 - (Nq)^m \quad (6.26)$$

Решая полученное неравенство относительно P_k получим

$$(1 - P_k P)^m < 1 - \left[1 - (Nq)^m\right]^{1/N} \quad (6.27)$$

В ряде случаев объект ЭВС содержит несколько групп однотипных основных элементов. Используя резервирование замещением, в этом случае нет необходимости иметь такое же количество резервных элементов. Для резервирования достаточно иметь один или несколько резервных элементов (меньше, нежели число основных в объекте).

Резервирование замещением, при котором группа основных элементов объекта резервируется одним или несколькими резервными элементами, каждый из которых может заменить любой отказавший основной элемент в данной группе, называют *скользящим резервированием*.

На рис. 6.9 показана схема скользящего резервирования. Скользящее резервирование позволяет при относительно небольших затратах (так как количество резервных блоков меньше количества основных) и незначительном увеличении веса и габаритов повысить надежность объекта.

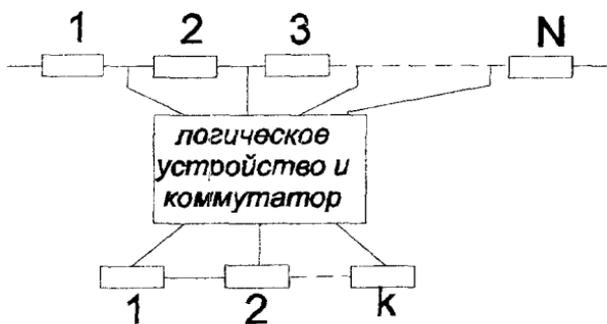


Рис. 6.9. Схема реализации скользящего резервирования

Для невозстанавливаемого объекта при простейшем потоке отказов и безотказном коммутирующем устройстве вероятность безотказной работы при скользящем резервировании определяется выражением [4, 5, 6].

$$P_o(k) = \prod_{j=0}^{n-1} \lambda_j \sum_{i=0}^{n-1} \frac{e^{-\lambda_i t}}{\lambda_i \sum_{\substack{i=0 \\ i \neq 1}}^{n-1} (\lambda_j - \lambda_i)}, \quad (6.28)$$

где k - число основных функционально необходимых элементов;

$n-1$ - число резервных элементов;

λ_j , - интенсивность перехода объекта из состояния H_j в состояние H_{j-1} . Количество состояний соответствует числу отказавших элементов.

Для случая равнонадежных коммутирующих устройств и ненагруженного резерва выражение (6.28) примет вид

$$P_o^{n,n}(k) = e^{-k(\lambda - \lambda_k)t} \sum_{j=1}^{n-1} \frac{[k(\lambda + \lambda_k)t]^j}{j!}, \quad (6.29)$$

где λ_k - интенсивность отказов коммутирующего элемента.

Целесообразность применения скользящего резервирования устанавливается сравнением надежности объекта с резервом и без него, т. е. P_c / P .

Следует отметить еще одну важную особенность резервирования замещением - это возможность восстановления вышедшего из строя резерва в то время, пока объект работает с другими резервными элементами. Это позволяет существенно повысить вероятность безотказной работы, так как наработка на отказ всегда больше среднего времени восстановления. Следовательно, вышедший из строя элемент будет восстановлен (если он восстанавливаемый) раньше, чем произойдет очередной отказ в объекте, т. е. в данном случае будет иметь место непрерывное пополнение резервных элементов.

Условием безотказной работы такого объекта с восстанавливаемым резервом является требование, чтобы число отказавших блоков E не превысило числа резервных блоков M , т. е, выполнялось неравенство

$$0 \leq E \leq M \quad (6.30)$$

Используя методы теории массового обслуживания [4, 5], нетрудно найти вероятность того, что в установившемся стационарном потоке на восстановлении будут находиться ровно E объектов:

$$P_E = \frac{\left(\frac{N\lambda}{\mu}\right)^E}{\sum_{k=0}^n \left(\frac{N\lambda}{\mu}\right)^k}, \quad (6.31)$$

где n - количество резервных элементов скользящего резерва

Выражение (6.31) справедливо для экспоненциального закона распределения времени безотказной работы и времени восстановления при наличии одного рабочего места для восстановления резервных элементов.

6.4. Оптимизация способов резервирования

Под оптимальным резервированием понимают резервирование, обеспечивающее получение наибольшего эффекта повышения надежности с наименьшими затратами.

Под «затратами» будем понимать факторы, определяющие оптимальность резервирования в зависимости от конкретных требований. В большинстве случаев эти факторы связаны между собой линейной зависимостью (количество элементов и стоимость, количество элементов и потребляемая мощность питания и т. д.) и удовлетворение одного из них влечет за собой удовлетворение остальных.

Говоря об оптимальности резервирования, в первую очередь нужно решить вопрос о выборе оптимального числа участков при раздельном резервировании. Максимальная надежность аппаратуры с раздельным резервированием может быть обеспечена только лишь при некотором оптимальном числе резервирующих элементов, если известна вероятность отказов коммутирующих устройств и кратности резервирования. Для выбора оптимального числа участков резервирования используем выражение (6.13). Решение можно проводить либо графическими, либо аналитическими методами.

В первом случае, задаваясь различным количеством резервируемых участков S , строят семейство кривых $P = f(S)$ для различных значений P и P_x и по ним находят значение S_{opt} , соответствующее максимальному значению вероятности безотказной работы.

Во втором случае приравнивают нулю первую производную $dP/dS = 0$ и решают полученное уравнение относительно S_{opt} . Следует, однако, отметить, что второй метод не всегда оказывается достаточно простым и удобным из-за громоздкости вычислений.

В некоторых случаях для электронных систем с малым временем работы, учитывая, что $q_k \ll 1$ и $q_i \ll 1$ можно правую часть выражения разложить в ряд по степеням q_i и q_k , пренебрегая членами высших порядков малости. Необходимо учитывать, что число участков резервирования определяется не только желанием полу-

читать максимальную надежность, но и рядом конструктивных соображений, которые иногда могут препятствовать реализации вычисленного значения S_{opt} . Поэтому в инженерной практике при выборе S_{opt} необходимо учитывать оба требования.

Осуществляя оптимизацию резервирования с учетом ограничений по стоимости, весу или габаритам, следует рассматривать два аспекта этой задачи:

- 1) обеспечение заданной надежности при минимальных затратах на резервирование;
- 2) обеспечение максимальной надежности при известных допустимых затратах на резервирование.

Суть первой задачи сводится к отысканию минимума функции

$$C = \sum_{i=1}^N (C_i m_i + C_0) \quad (6.32)$$

при $P \geq P_{\text{треб}}$

Во втором случае задача сводится к отысканию максимума функции

$$P = \prod_{i=1}^N p_i(m_i) \quad (6.33)$$

при $C \leq C_{\text{зад}}$

В равенствах (6.32) и (6.33):

C - общая стоимость системы (объекта);

$C_{\text{зад}}$ - заданная стоимость системы (объекта);

C_i - стоимость одного участка резерва;

m_i - количество резерва;

C_0 - начальная стоимость системы (объекта) без резерва;

$p_i(m_i)$ - вероятность безотказной работы i -то участка системы m_i резерва.

Реализацию оптимизации системы (объекта) можно представить в виде следующего процесса: в качестве исходной рассматривается система (объект) без резерва, а затем отыскивается участок для резервирования, дающий наибольший результат. Далее отыскивается новый участок резервирования для новой системы (системы с одним зарезервированным участком). Аналогично процесс продолжается до тех пор, пока не будет удовлетворено условие одной из задач. Более подробно идеи оптимального резервирования изложены в литературе по теории надежности [7, 13, 14]. Существенным недостатком резервирования является неизбежное увеличение веса и габаритов изделий, поэтому проблема надежности неразрывно связана с проблемой микроминиатюризации ЭиВС.

Следует отметить, что выбор критерия оценки оптимальности зависит от конкретных условий, т. е. учета конкретных доминирующих факторов. Так, для бортовой аппаратуры доминирующими факторами будут габариты и вес, а не стоимость.

ГЛАВА 7. Оценка показателей эксплуатационных свойств электронной аппаратуры

7.1. Требования к эксплуатации аппаратуры

Бережная эксплуатация аппаратуры имеет важное значение для обеспечения высокой надежности. Способы повышения надежности аппаратуры, которые применяются при ее проектировании и производстве, весьма трудоемки, дороги, часто неблагоприятно сказываются на габаритах и весе аппаратуры, а главное не всегда оказываются достаточно эффективными. В то же время высокое качество эксплуатации аппаратуры является реальным и вполне достижимым средством улучшения характеристик надежности. Для этого требуется лишь высококвалифицированный персонал и строгое выполнение всех правил эксплуатации.

Быстрейшее решение проблемы надежности требует объединения усилий разработчиков, производственников и эксплуатационников.

Срок службы и надежность аппаратуры увеличатся, если регулярно проводить профилактические работы с периодичностью, предусмотренной инструкцией по эксплуатации. Профилактические работы могут быть ежедневными, недельными, месячными, сезонными и т. д.

Иногда наряду с календарной периодичностью профилактических работ проводят профилактику по истечении определенного числа часов пребывания аппаратуры во включенном состоянии.

Все электроизмерительные приборы, которыми пользуются при профилактическом обслуживании, должны регулярно подвергаться местной и государственной проверке.

Использование неисправной и неточной измерительной аппаратуры ухудшает такую характеристику надежности, как коэффициент профилактики.

В профилактические работы входят:

- а) чистка аппаратуры от пыли и грязи;
- б) внешний осмотр всех блоков сверху и со стороны монтажа для выявления ослабевших креплений, ненадежных контактов и элементов, имеющих внешние признаки неисправностей (например, сопротивлений, изменивших цвет), следов коррозии и т. д.;
- в) настройка, регулировка и проверка аппаратуры (включая и измерение основных параметров);
- г) проверка в работе запасных блоков;
- д) проверка укомплектованности ЗИП.

Проведение профилактических работ не только предотвращает постепенные неисправности, но и уменьшает число внезапных отказов (обрывы, перегорания, короткие замыкания и др.). Действительно, интенсивность отказов элементов зависит от режимов работы и условий применения.

Изменения параметров некоторых элементов, непосредственно не вызывая отказа аппаратуры, могут неблагоприятно повлиять на режимы работы других элементов

и привести к выходу из строя аппаратуры. Такой отказ может быть предупрежден путем выявления и замены элемента, параметры которого существенно изменились.

Всякая аппаратура длительного применения подвергается ремонту, который подразделяется на текущий и капитальный.

Текущий ремонт, как правило, заключается в замене выявленного неисправного элемента, а иногда и в ремонте неисправного узла.

При капитальном ремонте заменяют значительное число элементов, ремонтируют или заменяют элементы автоматики, а также настраивают аппаратуру с целью получения всех параметров, предусмотренных ТУ на новую аппаратуру.

Капитальный ремонт производится тогда, когда большинство элементов, входящих в систему, приближается к этапу износа, и в результате резко возрастает число отказов.

Важная роль в сохранении надежности аппаратуры принадлежит прогнозированию отказов, производимому во время профилактических осмотров. Это мероприятие позволяет выявить и заменить те элементы электрической схемы и детали конструкции, которые подверглись значительному износу или старению и в ближайшее время могут послужить причиной отказа аппаратуры.

Выявить такой элемент, который находится накануне отказа, т. е. осуществить прогноз повреждения и своевременное его предотвращение, возможно с помощью следующих основных способов:

1. Снятие электрокалибровочных карт (ЭКК) по сопротивлениям, напряжениям и осциллограммам, может оказаться, что в некоторой точке схемы сопротивление, напряжение или параметры импульса (длительность, частота следования, амплитуда, крутизна фронтов, форма) выходят за пределы, предусмотренные заводскими ЭКК. Необходимо найти элемент или группу элементов, параметры которых изменились настолько, что привели к отклонению данных ЭКК за пределы нормы.

Чтобы произвести быстрый и эффективный анализ для выявления изношенных элементов по результатам снятия ЭКК, нужно хорошо знать электрическую схему и конструкцию.

2. Непосредственная проверка параметров элементов на специальной измерительной аппаратуре.

3. Граничные испытания.

При этом методе искусственно изменяют (увеличивают или уменьшают) те или иные напряжения, питающие данный узел схемы. Когда напряжение достигнет некоторого критического значения, наступит отказ в работе узла. Если величина критического напряжения слишком велика (проверка производится уменьшением напряжения), или слишком мала (проверка осуществляется повышением напряжения), значит в схеме имеется изношенный элемент, который надо заменить.

Разработка методики граничных испытаний весьма сложна и должна производиться для каждого конкретного вида аппаратуры.

7.2. Задачи эксплуатации ЭиВС и их характеристики

Основные фазы эксплуатации электронной аппаратуры показаны на рис. 7.1.

Задачами эксплуатации электронной аппаратуры являются организация и проведение различных мероприятий, обеспечивающих использование ЭиВС по ее назначению, подготовку к использованию, поддержание исправного состояния и продление ресурса аппаратуры.

Классификация основных задач при эксплуатации ЭиВС приведена на рис. 7.2.

Все задачи, выполняемые при эксплуатации ЭиВС, удобно разделить на следующие группы:

- 1) использование по назначению;
- 2) техническое обслуживание;
- 3) ремонт.

При использовании по назначению аппаратура (объект) может находиться либо под током (включение питания, контроль функционирования, настройка ЭиВС) выполнение основных функций, либо в обесточенном состоянии (хранение и т.п.)

В процессе использования аппаратуры по назначению она может переводиться из одного состояния в другое. Степень соответствия данной аппаратуры (объекта), системы стоящей перед нею задач принято определять эффективностью, т. е. приспособленностью аппаратуры системы к исполнению стоящих перед ней задач.

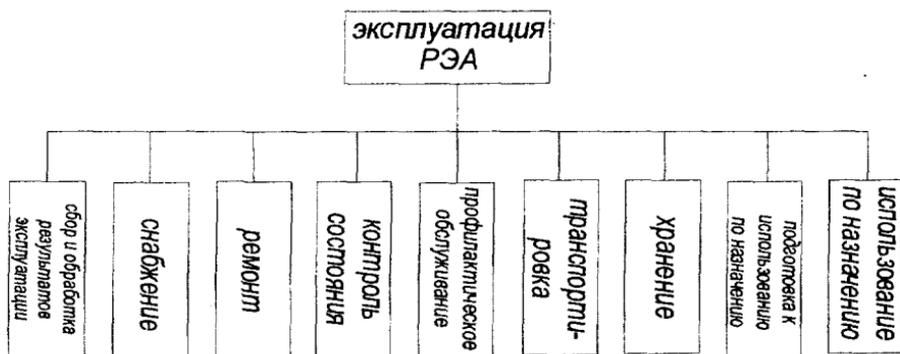


Рис. 7.1. Этапы эксплуатации РЭА

Для поддержания исправности и работоспособности аппаратуры и продления ее ресурса необходимо проводить техническое обслуживание.

Техническим обслуживанием называют комплекс работ для поддержания исправности или только работоспособности объекта при подготовке и использовании по назначению, при хранении и транспортировке.

Все мероприятия по техническому обслуживанию аппаратуры можно разделить на следующие этапы (виды):

- 1) контроль технического состояния;
- 2) профилактическое обслуживание;
- 3) снабжение;
- 4) сбор и обработка результатов эксплуатации.

Контроль технического состояния производится с целью оценки аппаратуры. Любая аппаратура предназначена для выполнения определенных функций, а ее состояние, т. е. способность выполнять эти функции, характеризуется некоторыми значениями ее параметров, заданных нормативно-технической документацией. Если величины параметров аппаратуры соответствуют установленным на них номинальным значениям допусков, то аппаратура считается исправной, т. е. она будет способна удовлетворительно выполнять заданные функции.

Классификация задач эксплуатации приведена на рис. 7.2.

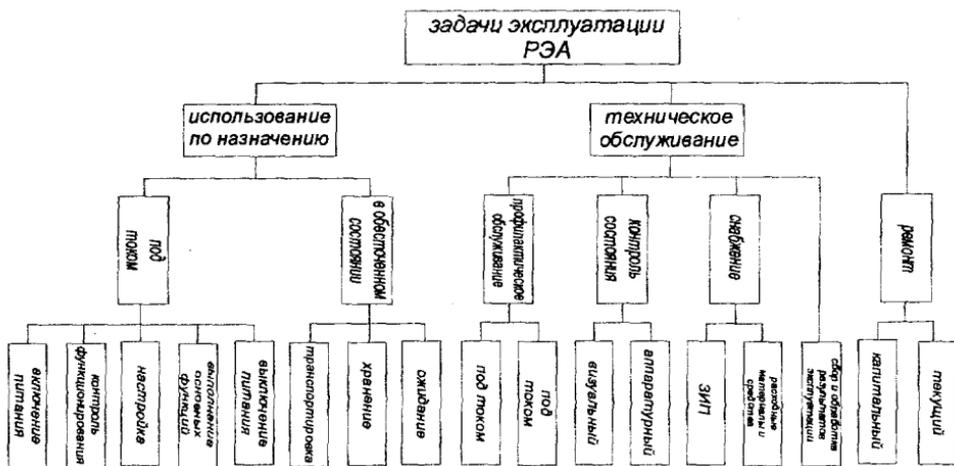


Рис. 7.2. Задачи эксплуатации ЭС и их классификация

Если хотя бы один из заданных параметров не будет соответствовать допуску, то аппаратура будет в неработоспособном состоянии, т.е. она не сможет обеспечить удовлетворительное выполнение всех заданных функций.

Таким образом, контроль технического состояния аппаратуры сводится к сопоставлению истинных значений параметров конкретной аппаратуры с их номинальными значениями с учетом допусков. На основе результатов этого сопоставления делается заключение о техническом состоянии аппаратуры.

Мероприятия по контролю технического состояния аппаратуры могут выполняться на всех фазах ее использования по назначению, при профилактическом обслуживании и ремонте.

Для обеспечения сохраняемости аппаратуры при хранении и безотказности в работе проводится профилактическое обслуживание, являющееся составной частью технического обслуживания.

Профилактическое обслуживание представляет собой комплекс мероприятий, направленных на поддержание аппаратуры в исправном состоянии, предупреждение отказов во время работы и продление ресурса.

Комплекс профилактических мероприятий состоит из следующих работ:

- а) внешний осмотр и чистка аппаратуры;
- б) контрольно-регулирующие работы;
- в) прогнозирование отказов и их предупреждение;
- г) сезонные, смазочные и крепежные работы;
- д) технические осмотры и проверки.

Для обеспечения нормальной эксплуатации аппаратуры должны быть организованы правильное снабжение расходными материалами и средствами укомплектованностью ЗИПа и своевременное их пополнение. Для обеспечения технического обслуживания объектов систем их снабжают комплектами ЗИПа и комплектом контрольно-измерительной аппаратуры.

Комплектом ЗИПа называют запасные части, инструменты, принадлежности, материалы и другое имущество, необходимые для технического обслуживания и ремонта объектов и скомплектованные в зависимости от назначения и особенностей использования. Технически правильное использование аппаратуры по назначению, ее поддержание в исправном состоянии и постоянной готовности к использованию по назначению, продление ее ресурса существенно зависят от организации эксплуатации электронной аппаратуры.

Организация эксплуатации состоит из мероприятий по подготовке квалифицированных кадров, снабжению аппаратуры запасными элементами (ЗИП) и расходными материалами, по планированию эксплуатации аппаратуры, а также по сбору и обработке результатов эксплуатации.

Качество эксплуатации аппаратуры в значительной степени определяется, как уже отмечалось, квалификацией обслуживающего персонала. Влияние человека можно рассматривать как результат деятельности, от которого зависят эксплуатационные свойства аппаратуры: человек как элемент системы, обеспечивающий ее функционирование с заданной производительностью; человек как источник предпосылок к отказам; человек как элемент системы, поддерживающий надежность аппаратуры на заданном уровне; человек как элемент системы, обеспечивающий ее восстановление (ремонт). Отсюда видно, какую важную роль играет человек на всех этапах эксплуатации аппаратуры.

Для качественной эксплуатации электронной аппаратуры производится планирование ее работы, технического обслуживания, снабжения и подготовки кадров.

На основе сбора и обработки результатов эксплуатации аппаратуры, анализа статистических данных намечаются мероприятия по повышению надежности и совершенствованию эксплуатации аппаратуры. При этом результаты эксплуатации и рекомендации по повышению надежности и совершенствованию аппаратуры должны быть своевременно направлены на завод-изготовитель.

Одним из этапов эксплуатации является ремонт аппаратуры (объекта).

В зависимости от степени износа и старения, характера неисправностей, от сложности и объема работ, необходимых для приведения электронной аппаратуры в исправное состояние, ремонт подразделяют на *плановый и неплановый, текущий, средний, капитальный, обезличенный и необезличенный*.

Плановый ремонт - это ремонт, предусмотренный в нормативной документации и осуществляемый в планируемые сроки.

Неплановый ремонт - оговаривается в нормативной документации, но осуществляется в неплановом порядке по мере необходимости.

Под текущим ремонтом понимают ремонт, осуществляемый для гарантированного обеспечения работоспособности объекта и состоящий в замене и восстановлении его отдельных частей и их регулировке. Текущий ремонт, как правило, выполняет обслуживающий персонал сразу же после возникновения (обнаружения) отказа аппаратуры (при использовании по назначению или при техническом обслуживании).

Капитальным ремонтом называют ремонт, осуществляемый с целью восстановления исправности и полного или близкого к полному восстановлению ресурса объекта с заменой или восстановлением его частей и их регулировкой. Капитальный ремонт производится ремонтными предприятиями.

Ремонт может быть необезличенным, когда выполнение восстановительных операций производится с учетом принадлежности восстанавливаемых деталей и сборочных единиц к определенному экземпляру данного вида объекта.

При обезличенном ремонте восстановительные операции производятся без учета принадлежности восстанавливаемых деталей и сборочных единиц к определенному экземпляру данного вида объекта.

Таким образом, процесс эксплуатации электронной аппаратуры состоит из большого комплекса различных мероприятий, качество выполнения которых существенно влияет на эксплуатационные свойства аппаратуры.

Под эксплуатационными свойствами электронной аппаратуры понимают ее безотказность, сохраняемость, долговечность, ремонтпригодность, степень готовности к выполнению основных функций и приспособленность к техническому обслуживанию, проявляемыми в конкретных условиях эксплуатации.

Рассмотренные понятия и определения позволяют качественно характеризовать эксплуатационные свойства аппаратуры. Однако, для решения вопросов, связанных с анализом, оценкой и сравнением аппаратуры по эксплуатационным свойствам, рациональной организацией эксплуатации аппаратуры, необходимо знать количественные характеристики (показатели) эксплуатации.

Показатели эксплуатационных свойств аппаратуры должны удовлетворять ряду общих требований. К ним относятся;

- 1) возможность максимального учета факторов, определяющих эксплуатационные свойства аппаратуры;
- 2) возможность задания числом и использования при инженерных расчетах;

3) возможность задания эксплуатационного показателя в качестве технического параметра или получения его из тактико-технического задания на проектируемую аппаратуру;

4) возможность удобства и быстроты экспериментальной проверки показателя в процессе эксплуатации или специальных испытаний;

5) согласованность с понятиями и определением надежности;

6) возможность применения в любой электронной аппаратуре.

Для количественной оценки эксплуатационных свойств электронной аппаратуры, как уже отмечалось, применяют соответствующие единичные и комплексные показатели.

7.3. Особенности оценки показателей эксплуатационных свойств ЭиВС по результатам эксплуатации

Основной особенностью оценки эксплуатационных свойств ЭиВС по результатам эксплуатации является ограниченность статистического материала, которого недостаточно для точного определения показателей эксплуатации. Однако ограниченный объем статистического материала (число наблюдений, число опытов) может быть обработан и использован для ориентировочного определения важнейших числовых характеристик искомого показателя эксплуатации: математического ожидания, дисперсии и др.

Следует отметить, что любое значение искомого показателя, вычисленное на основе ограниченного числа опытов, всегда будет содержать элемент случайности. Такое приближенное, случайное значение показателя и называют оценкой показателя. Так, для оценки математического ожидания (точного значения показателя) служит среднее арифметическое наблюдаемых значений показателя в n независимых опытах. При очень большом числе опытов среднее арифметическое будет с большой вероятностью весьма близко к математическому ожиданию. Если же число опытов n невелико, то замена математического ожидания средним арифметическим приводит к какой-то ошибке. Эта ошибка в среднем тем больше, чем меньше число опытов.

Таким образом, в качестве оценки любого показателя эксплуатации ЭиВС m берется среднее арифметическое наблюдаемых значений m^* :

$$m^* = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}, \quad (7.1)$$

где x_i - значение искомого i -го показателя;

n - число опытов по определению величины показателя m .

Статистическая дисперсия оценки показателя эксплуатации равна [4, 5, 10]:

$$D^* = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - m^*)^2}{n-1} = \left[\frac{\sum_{i=1}^n x_i^2}{n} - m^{*2} \right] \frac{n}{n-1} \quad (7.2)$$

Для того, чтобы иметь представление о точности и надежности оценки показателя эксплуатации (случайной величины), пользуются понятиями доверительных интервалов и доверительных вероятностей. Поясним эти понятия. Пусть для показателя m из опыта получена оценка m^* , нужно оценить возможную при этом ошибку. Назначим некоторую достаточно большую вероятность β (например, $\beta = 0,9, 0,95$ или $0,99$) такую, что событие с вероятностью β можно считать практически достоверным и найдем такое значение интервала \mathcal{E} , для которого

$$P(m^* - \mathcal{E} < m < m^* + \mathcal{E}) = \beta \quad (7.3)$$

Это равенство означает, что с вероятностью β неизвестное значение показателя m попадает в интервал

$$J_\beta = (m^* - \mathcal{E}; m^* + \mathcal{E}) \quad (7.4)$$

Здесь вероятность β принято называть доверительной вероятностью (или надежностью), а интервал J_β - доверительным интервалом (или точностью).

Границы интервала J_β : $a_1 = m^* - \mathcal{E}_1$ и $a_2 = m^* + \mathcal{E}_2$ называют доверительными границами.

Рассмотрим порядок нахождения доверительных интервалов. Определение доверительного интервала для математического ожидания.

Дано: n независимых опытов над случайной величиной x , характеристики которой - математическое ожидание m и дисперсия D - неизвестны. Для этих параметров получены оценки:

$$m^* = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}; \quad D^* = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - m^*)^2}{n-1} \quad (7.5)$$

Требуется построить доверительный интервал, соответствующий доверительной вероятности (надежности) β , для математического ожидания m величины x . На практике даже при относительно небольшом числе слагаемых (независимых опытах порядка $10 \sim 20$) закон распределения суммы можно приближенно считать нормальным. Тогда связь между доверительной вероятностью (надежностью) β и доверительным интервалом (точностью) выражается через функцию Лапласа:

$$\Phi\left(\frac{\varepsilon_{\beta}}{\sigma^* \sqrt{2}}\right) = \beta, \text{ где } \sigma^* = \sqrt{\frac{D^*}{n}} \quad (7.6)$$

Откуда находим значение точности оценки ε_{β} с надежностью β :

$$\varepsilon_{\beta} = \sigma^* \sqrt{2} \Phi^{-1}(\beta), \quad (7.7)$$

где $\Phi^{-1}(\beta)$ - функция, обратная функции Лапласа, т. е. такое значение аргумента, для которого функция Лапласа равна β .

Таким образом, приближенно решается задача построения доверительного интервала:

$$J_{\beta} = (m^* - \varepsilon_{\beta}; m^* + \varepsilon_{\beta}) \quad (7.8)$$

Чтобы избежать при вычислении ε_{β} обратного интерполирования в таблицах функции Лапласа, приведены значения величины t_{β} в зависимости от β :

$$t_{\beta} = \sqrt{2} \Phi^{-1}(\beta) \quad (7.9)$$

Величина t_{β} определяет для нормального закона число средних квадратичных отклонений, которое нужно отложить вправо и влево от центра рассеивания для того, чтобы вероятность попадания в полученный участок была равна β . Через величину t_{β} доверительный интервал выражается в виде

$$J_{\beta} = (m^* - t_{\beta} \sigma_m^*; m^* + \sigma_m^*) \quad (7.10)$$

Аналогичным образом строится доверительный интервал и для дисперсии:

$$J_{\beta} = (D^* - t_{\beta} \sigma_D^*; D^* + \sigma_D^*), \quad (7.11)$$

где D^* определяется по формулам (7.2), (7.5); t_{β} в зависимости от заданной вероятности β ,

$$\sigma_{D^*}^* = \sqrt{\frac{2}{n-1}} D^* \quad (7.12)$$

Рассмотренные особенности оценки показателей эксплуатации ЭиВС следует учитывать при определении всех статистических показателей эксплуатационных свойств ЭиВС. Для оценки точности и надежности статистических показателей, которые приводятся ниже, целесообразно использовать выражения (7.1) - (7.11).

7.4. Оценка показателей безотказности

Важнейшим эксплуатационным свойством аппаратуры является ее безотказность. Наиболее употребительными показателями безотказности при эксплуатации ЭИВС являются *наработка на отказ и вероятность безотказной работы*.

Под наработкой на отказ понимают отношение наработки (продолжительности или объема работы) восстанавливаемого объекта к математическому ожиданию числа его отказов в течение этой наработки.

Примечание. При выражении наработки в единицах времени, что обычно применяется для оценки наработки ЭИВС, под наработкой на отказ понимают среднее время безотказной работы восстанавливаемого объекта. Поэтому в дальнейшем под наработкой для определенности будем подразумевать время.

Нарботка на отказ статистически определяется отношением произведения количества наблюдаемых объектов N на величину заданной наработки T_p к суммарному числу отказов восстанавливаемых объектов в течение заданной наработки:

$$T^* = \frac{NT_p}{\sum_{i=1}^N r_i} \quad (7.13)$$

Рассмотрим особенности определения статистической вероятности безотказной работы в частном случае, а именно, по результатам эксплуатации (испытаний) одного восстанавливаемого объекта.

Для опытного определения показателя безотказности восстанавливаемого объекта проводится наблюдение за испытанием или эксплуатацией данного объекта в течение некоторой суммарной наработки T_Σ в заданных условиях. При этом определяются наработки между соседними отказами (рис. 7.3), которые образуют ряд опытных наработок: $t_1, t_2, \dots, t_i, \dots, t_n$

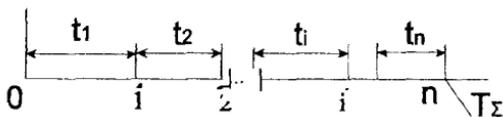


Рис. 7.3. Суммарная наработка восстанавливаемого объекта

С помощью этого ряда наработок между отказами можно определить статистический показатель вероятности безотказной работы объекта. Для наглядности получения расчетной формулы представим члены статистического ряда наработок в виде рис. 7.4, где T_p - заданная (требуемая) наработка объекта.

Из рис. 7.4 следует, что статистическая вероятность безотказной работы восстанавливаемого объекта на протяжении заданной наработки T_p определяется выражением

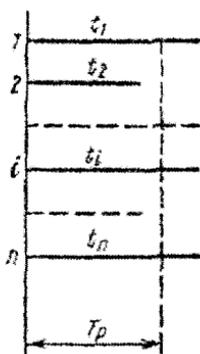


Рис. 7.4. К определению статистической вероятности безотказной работы по опытным данным одного восстанавливаемого объекта

$$P^*(T_p) = \frac{n - r(T_p)}{n} = 1 - \frac{r(T_p)}{n}, \quad (7.14)$$

где n - число отказов восстанавливаемого объекта за суммарное время наработки T_p ; $r(T_p)$ - число отказов объекта с наработкой между отказами $t_i < T_p$.

Следует напомнить, что точность оценки $P^*(t)$ зависит от количества отказов n .

В период нормальной эксплуатации ЭиВС поток ее отказов является простейшим. В этом случае параметр потока отказов (интенсивность отказов) ЭиВС может быть определен через наработку на отказ аппаратуры, а именно $\omega^* = 1/T^*$.

Статистически (по результатам эксплуатации) параметр потока отказов ЭиВС для любого периода эксплуатации определяется по формуле

$$\omega^*(t) = \frac{n(t_{i+1}) - n(t_i)}{\Delta t [N - n(t_i)]}, \quad (7.15)$$

7.5. Оценка показателей долговечности

Показателями долговечности служат *ресурс* и *срок службы*. Различают следующие показатели срока службы:

- а) средний срок службы

$$T_{\text{сл.сп}}^* = \frac{\sum_{i=1}^n t_{\text{сл.}i}}{n}, \quad (7.16)$$

где $t_{\text{сл.}i}$ - срок службы i -ого объекта; n - число объектов, участвующих в опыте,
 б) средний срок службы до списания

$$T_{\text{сл.сп.сн}}^* = \frac{\sum_{i=1}^n t_{\text{сл.сн}i}}{n}, \quad (7.17)$$

где $t_{\text{сл.сн}i}$ - срок службы i -ого объекта от начала эксплуатации до списания, обусловленного предельным состоянием; $T_{\text{ср.}p}$ - гамма-процентный срок службы, т. е. срок службы, в течение которого объект не достигнет предельного состояния с заданной вероятностью γ процентов; $T_{\text{сл.сп.}d.p.}$ - средний срок службы до среднего (капитального) ремонта; $T_{\text{сл.сп.}м.p.}$ - средний срок службы между средними (капитальными) ремонтами. Эти величины определяются соответственно по формулам:

$$T_{\text{сл.сп.}d.p.} = \frac{\sum_{i=1}^m t_{\text{сл.}d.p.i}}{m}; \quad T_{\text{сл.сп.}м.p.} = \frac{\sum_{i=1}^n t_{\text{сл.}м.p.i}}{m} \quad (7.18)$$

Разновидностью срока службы является гарантийный срок изготовителя объекта.

Гарантийным сроком службы объекта называют срок, в течение которого выявляются дефекты, не обнаруженные при изготовлении объекта, а изготовитель при условии соблюдения потребителем правил эксплуатации объекта, в том числе правил хранения и транспортировки, обеспечивает выполнение установленных требований к объекту и несет ответственность.

Приведем основные расчетные формулы для оценки показателей ресурса.

Назначенный ресурс для объекта R_n назначается перед началом его эксплуатации. При эксплуатации необходимо учитывать суммарную наработку объекта с тем, чтобы при достижении величины назначенного ресурса R_n прекратить его эксплуатацию.

Разновидностью назначенного ресурса является гарантийная наработка.

Гарантийной наработкой называют наработку, в течение которой выявляют дефекты, необнаруженные при изготовлении объекта, а изготовитель, при условии соблюдения потребителем правил эксплуатации объекта, в том числе правил хранения и транспортировки, обеспечивает выполнение установленных требований к объекту и несет предусмотренную ответственность;

а) средний ресурс

$$R_{\text{сп}}^* = \frac{\sum_{i=1}^n r_i}{n}, \quad (7.19)$$

где r_i – ресурс i -го объекта;

б) средний ресурс между ремонтами

$$R^*_{м.р} = \frac{\sum_{i=1}^m r_{м.р.i}}{m}, \quad (7.20)$$

где $r_{м.р.i}$ – ресурс объекта на i -м межремонтном периоде;

в) средний ресурс до списания

$$R^*_{ср.сн} = \frac{\sum_{i=1}^m r_{\Sigma i}}{m}, \quad (7.21)$$

где r_{Σ} – ресурс до списания i -го объекта.

7.6. Оценка показателей сохраняемости

Сохраняемость объекта характеризуется его способностью противостоять отрицательному влиянию хранения и транспортировки объекта на его безотказность и долговечность.

Поскольку выполнение основных функций объекта (действие, применение, непосредственное использование по назначению) является его основной фазой (режимом) эксплуатации, особенное значение имеет влияние периода хранения и транспортировки на последующее поведение объекта при выполнении основных функций. Продолжительное хранение и транспортировка в неблагоприятных условиях иногда не сказывается заметно на поведении объекта во время его пребывания в этих этапах (режимах), но при последующей работе безотказность таких объектов может оказаться значительно хуже, чем безотказность действия однотипных объектов, не находившихся на хранении и не подвергавшихся транспортировке.

Поэтому срок сохраняемости нельзя отождествлять со сроком возникновения отказа во время хранения. Последний характеризует поведение объекта (его безотказность) только во время хранения и не характеризует влияние хранения на безотказность объекта при последующей работе (при выполнении объектом основных функций).

Основным показателем этапа сохраняемости объекта является средний срок сохраняемости, который статистически определяется выражением

$$T_{c.ср}^* = \frac{\sum_{i=1}^N T_{ci}}{\sum_{i=1}^N r_i} \quad (7.22)$$

где N - количество наблюдаемых объектов; r_i - число отказов i -го объекта за время T_{ci} ; T_{ci} - срок сохраняемости i -го объекта.

Кроме среднего срока сохраняемости объекта $T_{c.ср}$ для режимов (фаз эксплуатации) хранения и транспортировки могут применяться следующие показатели безотказности:

- 1) вероятность безотказного хранения за время $t_c - P_{XP}(t_c)$ (7.13), (7.14);
- 2) параметр потока отказов при хранении ω_{Φ}^* (7.15);
- 3) время хранения на отказ T_x^* (7.11);
- 4) гамма-процентный срок сохраняемости $T_{c,\gamma}$.

7.7. Оценка показателей ремонтпригодности

Показателями ремонтпригодности являются *вероятность восстановления в заданное время и среднее время восстановления*.

Среднее время восстановления - есть математическое ожидание времени восстановления работоспособности.

При восстановлении (ремонте) аппаратуры в качестве случайной величины выступает время ремонта, зависящее от многих факторов: характера возникшего отказа, приспособленности аппаратуры к быстрому отысканию отказа, степени подготовки обслуживающего персонала, наличия запасных элементов и др.

Наиболее полной характеристикой случайной величины является закон ее распределения.

Примем за показатель ремонтпригодности вероятность своевременного восстановления (завершения ремонта за время t_B), т. е. вероятность того, что случайное время ремонта τ_B будет не более заданного t_B . По определению,

$$G(t_B) = F\{\tau_B \leq t_B\}, \quad (7.23)$$

где $G(t_B)$ - функция распределения времени ремонта.

Для определения функции распределения времени ремонта (восстановления) примем допущение об ординарности потока восстановления, т. е. вероятность двух и более завершений ремонта за бесконечно малый интервал ($t_B > t_B + dt_B$) является бесконечно малой величиной более высокого порядка, чем dt_B . Завершение ремонта в интервале времени ($t_B, t_B + dt_B$) может быть только в том случае, если в интервале

(O, t_d) система не была отремонтирована. Вероятность того, что в интервале (O, t_B) система не была отремонтирована, равна

$$P_0 = 1 - G(t_B) \quad (7.24)$$

Вероятность завершения ремонта в интервале ($t_B, t_B + dt_B$) при условии, что система находилась в ремонте интервал времени (O, t_d), равна

$$P_1 = \nu(t_B) dt_B, \quad (7.25)$$

где $\nu(t_d)$ - интенсивность потока восстановлений (ремонтов).

На основании теоремы умножения вероятностей вероятность окончания ремонта системы в течение интервала времени ($t_B, t_B + dt_B$) (плотность вероятности) равна

$$dG(t_B) = P_0 P_1 = 1[1 - G(t_B)]\nu(t_B) dt_B \quad (7.26)$$

Решение дифференциального уравнения (7.26) при начальных условиях $G(0) = 0$ приводит к формуле

$$G(t_B) = 1 - \exp\left[-\int_0^{t_B} \nu(t_B) dt_B\right], \quad (7.27)$$

которая является функцией распределения времени ремонта" при произвольном распределении t_B

При экспоненциальном распределении времени ремонта интенсивность ремонтов является постоянной величиной $\nu(t_d) = const$. В этом случае

$$G(t_B) = 1 - \exp[-\nu t_B]; \quad (7.28)$$

$$g(t_B) = G'(t_B) = \nu \exp[-\nu t_B], \quad (7.29)$$

где $g(t_B)$ - дифференциальный закон распределения (плотность вероятности) времени ремонта.

Учитывая, что экспоненциальное распределение близко к реальному для многих видов электронной аппаратуры [4, 15] и существенно упрощает математический аппарат, примем его как основное распределение времени ремонта.

Возможность этого допущения подтверждает тот факт, что основное количество отказов электронной аппаратуры дают элементы, которые быстро обнаруживаются и легко заменяются. Трудоемкие ремонтные работы, связанные с перепайкой схемных элементов, бывают гораздо реже.

Определим математическое ожидание времени ремонта. По определению математическое ожидание

$$M(t_B) = T_B = \int_0^{\infty} t_B G'(t_B) dt_B = \int_0^{\infty} t_B \nu \exp(-\nu t_B) dt_B = \frac{1}{\nu} \quad (7.30)$$

Таким образом, при экспоненциальном распределении времени ремонта среднее время восстановления T_B (ремонта) равно обратной величине интенсивности восстановления. С учетом (7.30) выражения (7.28) и (7.29) примут вид

$$G(t_B) = 1 - e^{-t_B/T_B} \quad (7.31)$$

$$G'(t_B) = \frac{1}{T_B} e^{-t_B/T_B} \quad (7.32)$$

Из выражений (7.31) и (7.32), наиболее полно характеризующих ремонтпригодность, следует, что среднее время восстановления системы полностью определяет распределение времени ремонта. Это позволяет принять среднее время восстановления системы как основной показатель ремонтпригодности, через который могут быть выражены дополнительные показатели.

Среднее время восстановления можно определить по результатам эксплуатации или специального эксперимента по формуле

$$T_B^* = \frac{\sum_{i=1}^n t_{Bi}}{n} \quad (7.33)$$

где T_B^* – статистическое значение среднего времени восстановления объекта;

t_{Bi} – время ремонта аппаратуры при устранении i -го отказа;

n – количество отказов объекта за расчетный промежуток времени.

Величина T_B^* показывает, сколько в среднем затрачивается времени на устранение одного отказа.

Следует заметить, что точность вычисления T_B^* (степень приближения к истинному значению T_B) зависит от количества отказов n , по которым оно определяется, и увеличивается с их увеличением.

7.8. Показатели эксплуатационных свойств ЭиВС

Различные виды продукции (объекты) создаются для удовлетворения определенных потребностей в соответствии с их назначением. Качество объектов характеризуется некоторой совокупностью свойств. Одним из них является совокупность эксплуатационных свойств. Как было показано, количественно эксплуатационные свойства объекта оцениваются с помощью показателей, учитывающих особенности объекта, режимов и условий его эксплуатации. Показатели эксплуатации в значительной степени количественно характеризуют наиболее общие эксплуатационные

свойства объектов. Различают *единичные и обобщенные* (комплексные) показатели эксплуатации. Единичные показатели эксплуатации были рассмотрены выше, ими являются безотказность, сохраняемость, долговечность и ремонтпригодность.

На практике для оценки эксплуатационных свойств объектов часто пользуются также обобщенными показателями эксплуатации.

Обобщенным (комплексным) показателем эксплуатационных свойств называют показатель эксплуатации, относящийся к нескольким свойствам, характеризующим качество эксплуатации объекта.

Обобщенными показателями эксплуатации объекта являются:

- а) коэффициент готовности K_G ;
- б) коэффициент технического использования $K_{т.и.}$;
- в) коэффициент оперативной готовности $K_{о.г.}$;
- г) средняя суммарная трудоемкость технического обслуживания $T_{ср. \Sigma т.о.}$;
- д) удельная суммарная трудоемкость технического обслуживания $T_{у. \Sigma т.о.}$;
- е) средняя суммарная трудоемкость ремонтов $T_{ср. \Sigma р.}$;
- ж) удельная суммарная трудоемкость ремонтов $T_{у. \Sigma р.}$;
- з) эффективность технического обслуживания W ;
- и) коэффициент стоимости эксплуатации $K_{с.э.}$

7.9. Коэффициент готовности

Рассмотрим физический смысл данного показателя и получим формулу для его расчета.

Как отмечалось ранее, важнейшими эксплуатационными свойствами электронной аппаратуры являются ее безотказность и ремонтпригодность (восстанавливаемость). Аппаратура обладает тем более высокими эксплуатационными свойствами, т. е. аппаратура считается тем лучше, чем меньше отказов происходит при работе и чем меньше время ее ремонта.

От степени приспособленности аппаратуры к ремонту во многом зависит вероятность ее нахождения в работоспособном состоянии.

Определим вероятность работоспособного состояния аппаратуры без учета простоев при профилактическом обслуживании. Для нахождения указанной вероятности примем следующие допущения;

- а) поток отказов аппаратуры является простейшим ($\lambda(t) = const$);
- б) время ремонта аппаратуры подчинено экспоненциальному закону.

В начальный момент времени аппаратура может находиться в двух состояниях - исправном и неисправном. Определим вероятность исправного состояния аппаратуры в момент времени $t + \Delta t$.

При исправном исходном состоянии:

1. Исправная к моменту времени t система останется исправной и течение интервала времени $t, t + \Delta t$.

Вероятность этого события

$$P(t)[1 - \lambda \Delta t + o(\Delta t)] = P(t)(1 - \lambda \Delta t) + o(\Delta t), \quad (7.34)$$

где $P(t)$ - вероятность безотказного состояния системы за время t ; λ - интенсивность отказов системы; $o(\Delta t)$ - бесконечно малая более высокого порядка, чем Δt , т.е.

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{o(\Delta t)}{\Delta t} = 0 \quad (7.35)$$

2. Исправная к моменту времени t система откажет в течение интервала времени $t, t + \Delta t$ и за этот же интервал будет восстановлена. Вероятность этого события

$$P(t)[\lambda \Delta t + o(\Delta t)] \nu \Delta t + o(\Delta t) = o(\Delta t), \quad (7.36)$$

где ν - вероятность интенсивность восстановления системы.

3. Все другие комбинации событий, приводящих систему в исправное состояние, имеют порядок $o(\Delta t)$

При неисправном исходном состоянии:

1. Неисправная к моменту времени t система будет восстановлена в течение интервала времени, $t, t + \Delta t$

Вероятность этого события

$$[1 - P(t)] \nu \Delta t + o(\Delta t) = [1 - P(t)] \nu \Delta t + o(\Delta t) \quad (7.37)$$

2. Все другие комбинации событий, приводящих систему в исправное состояние, имеют порядок $o(\Delta t)$.

Вероятность того, что система к моменту времени $t, t + \Delta t$ окажется исправной, на основании теоремы сложения вероятностей равна сумме вероятностей:

$$P(t + \Delta t) = P(t)(1 - \lambda \Delta t) + [1 - P(t)] \nu \Delta t + o(\Delta t) \quad (7.38)$$

Из уравнения (7.38) получаем

$$\frac{P(t + \Delta t) - P(t)}{\Delta t} = -(\lambda + \nu)P(t) + \nu + \frac{o(\Delta t)}{\Delta t} \quad (7.39)$$

На основании выражения (7.39) при устремлении $\Delta t \rightarrow 0$ получим дифференциальное уравнение

$$\frac{dP(t)}{dt} = -(\lambda + \nu)P(t) + \nu \quad (7.40)$$

Решение уравнения (7.40) имеет вид

$$P(t) = \frac{\nu + C \exp[-(\lambda + \nu)t]}{\lambda + \nu}, \quad (7.41)$$

где C – произвольная постоянная, определяющаяся из начальных условий.

Если в момент начала эксплуатации ($t = 0$) система была исправной ($P(0) = 1$), то согласно (7.41) $C = \lambda$, а вероятность исправного состояния в момент времени t

$$P_{0,0}(t) = \frac{\nu + \lambda \exp[-(\lambda + \nu)t]}{\lambda + \nu} \quad (7.42)$$

Если при $t = 0$ система находилась в неисправном состоянии [$P(0) = 0$], то $C = \nu$ и

$$P_{1,0}(t) = \frac{\nu - \nu \exp[-(\lambda + \nu)t]}{\lambda + \nu}, \quad (7.43)$$

где $P_{1,0}(t)$ – вероятность исправного состояния системы в момент времени t при неисправном исходном состоянии, т. е. вероятность того, что система будет отремонтирована за время t .

Из-выражений (7.42) и (7.43) следует, что при устремлении $t \rightarrow \infty$ обе вероятности стремятся к стационарному значению, равному коэффициенту готовности системы:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} P_{0,0}(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} P_{1,0}(t) = (t) = \frac{\nu}{\lambda + \nu} = \frac{T}{T + T_B} = K_G \quad (7.44)$$

где T – наработка на отказ

Значение вероятности работоспособного состояния восстанавливаемой аппаратуры в любой момент времени в предположении простейших потоков отказов и восстановлений и без учета простоев на профилактику определяют по формуле полной вероятности сложного события

$$P_p = (t) = K_{вкл} P_{0,0}(t) + (1 - K_{вкл}) P_{1,0}(t) \quad (7.45)$$

здесь

$$K_{вкл} = N_{вкл} / N_{о,вкл}, \quad (7.46)$$

где $N_{о,вкл}$ – общее число включений аппаратуры (объектов) для работы под током; $N_{вкл}$ – число объектов, оказавшихся исправными в момент включения, или число благоприятных включений аппаратуры (объектов); $K_{вкл}$ – коэффициент удачного включения аппаратуры; он характеризует средний процент объектов, оказавшихся исправными в момент включения; в пределе, при $N_{о,вкл} \rightarrow K_{вкл}$ стремится к вероятности того, что объект окажется исправным в момент включения; $1 - K_{вкл} = K_{н,вкл}$ – коэффициент неудачного включения аппаратуры; $P_{0,0}(t)$ – вероятность работоспособного состояния аппаратуры в любой момент времени t при условии, что в момент включения ($t = 0$) она оказалась исправной [определяется по формуле (7.42)]; $P_{1,0}(t)$ – вероятность исправного состояния аппаратуры в любой момент времени при условии, что в момент включения аппаратура оказалась неисправной [определяется по формуле (7.43)].

Если $t \rightarrow \infty$, из выражений (7.44) и (7.45) следует, что вероятность работоспособного состояния $P_p(t)$ стремится к стационарному значению, равному коэффициенту готовности K_r . Таким образом, коэффициент готовности аппаратуры представляет собой установившееся значение вероятности исправного состояния объекта.

Коэффициент готовности статистически определяется отношением суммарного времени пребывания наблюдаемых объектов в работоспособном состоянии к произведению числа этих объектов на продолжительность эксплуатации

$$K_r = \frac{\sum_{i=1}^N \xi_i}{NT_p}, \quad (7.47)$$

где ξ_i - суммарное время пребывания i -го объекта в работоспособном состоянии ($i = 1, 2, \dots, N$); T_p - продолжительность эксплуатации, состоящей из последовательно чередующихся интервалов времени работы (выполнения основных функций) и восстановления.

Коэффициент готовности является важным эксплуатационным показателем аппаратуры; он характеризует как безотказность аппаратуры, так и ее ремонтпригодность. В настоящее время в тактико-технических требованиях на аппаратуру, особенно специального назначения, указывается величина коэффициента готовности, которому должна удовлетворять аппаратура. Рассмотрим, насколько полно показатели K_r и T_e удовлетворяют общим требованиям, предъявляемым к показателям эксплуатационных свойств аппаратуры.

Требование возможности получения значения показателя T_e из технического задания (ТЗ) и задания его числом удовлетворяется наличием связи коэффициента готовности аппаратуры, который задается в ТЗ, со средним временем восстановления (7.46).

Экспериментальное определение показателя T_e производят так же, как и показатель T . Количественное значение показателя по экспериментальным данным определяют по формуле (7.33).

Согласованность показателя ремонтпригодности T_e с определением надежности в широком смысле и возможность применения его к любой аппаратуре очевидна.

Коэффициент готовности является производным показателем от наработки на отказ и среднего времени восстановления и обладает теми же свойствами, которыми обладают показатели T и T_e .

Таким образом, среднее время восстановления и коэффициент готовности удовлетворяют всем общим требованиям, которые предъявляются к показателям эксплуатационных свойств электронной аппаратуры.

7.10. Трудоемкость технического обслуживания

Трудоемкости (объемы) технического обслуживания [профилактического обслуживания, контроля состояния объекта и (или) снабжения] подразделяют на *средние и удельные суммарные трудоемкости*.

Средней суммарной трудоемкостью технического обслуживания называют математическое ожидание суммарных трудозатрат на проведение технического обслуживания объекта за определенный период эксплуатации.

Под *удельной суммарной трудоемкостью* технического обслуживания понимают отношение средней суммарной трудоемкости технического обслуживания к математическому ожиданию суммарной наработки объекта за один и тот же период эксплуатации.

Для выполнения технического (профилактического) обслуживания обычно назначают сроки (периодичность) и время (продолжительность) их проведения.

Техническое (профилактическое) обслуживание, на выполнение которого установлены сроки (периодичность) и время проведения, называют регламентными работами.

Объем регламентных (профилактических) работ на ЭиВС, т.е. трудоемкость ее технического обслуживания, количественно удобно оценивать расходом времени на выполнение этих работ.

Тогда средняя суммарная трудоемкость технического (профилактического) обслуживания $T_{cp\Sigma t.o}$ будет определяться как среднее время, необходимое для проведения технического обслуживания объекта за определенный период эксплуатации t ,

$$T_{cp\Sigma t.o}(t) = N_{np}(t) \sum_{i=1}^n t_{npi} \quad (7.48)$$

где t_{npi} - среднее время работы при выполнении i -ой операции профилактики (например, операция по контролю параметра, операция по регулировке параметра, стыковка кабелей, чистка блока или элемента, смазка аппаратуры и т.д.); n - число операций при выполнении одного профилактического обслуживания; $\sum_{i=1}^n t_{npi} = T_{np}$ - среднее время выполнения одной профилактики;

$N_{np}(t) = t/T_p = 1, 2, 3, \dots$, N_{np} - количество профилактических работ за время t , округленное до целого числа, здесь T_{np} - периодичность выполнения профилактических работ.

Удельная суммарная трудоемкость технического обслуживания может быть рассчитана по формуле

$$T_{y\Sigma t.o}(t) = \frac{T_{cp\Sigma t.o}(t)}{T_{\Sigma}(t)} \quad (7.49)$$

где $T_{ср\ i\ o}(t)$ – средняя суммарная трудоемкость технического обслуживания за период эксплуатации t , определяется по формуле (7.48); $T_{\Sigma}(t)$ – математическое ожидание суммарной наработки объекта за один и тот же период эксплуатации t . Статистически наработку $T_{\Sigma}(t)$ можно рассчитать по формуле

$$T_{\Sigma}(t) = \frac{\sum_{i=1}^N t_{\Sigma i}}{N}, \quad (7.50)$$

где $t_{\Sigma i}$ – суммарная наработка i -го объекта за период эксплуатации t , N – число наблюдаемых объектов.

Объем профилактических работ является количественной характеристикой, которую можно использовать для оценки такого качества аппаратуры, как обслуживаемость. От того, насколько хорошо продуманы и обеспечены вопросы обслуживаемости (выполнения операций по техническому обслуживанию), существенно зависит объем профилактических (ремонтных) работ. Как следует из (7.48), объем профилактических работ зависит от количества операций n , времени выполнения каждой операции t_{opi} и периодичности проведения профилактики T_p .

Главным содержанием профилактических (регламентных) работ являются контрольно-регулирующие работы, т. е. контроль состояния основных параметров аппаратуры и их изменение с помощью предусмотренных органов регулировок без изменения схемы и конструкции.

Наиболее существенно объем регламентных работ зависит от способа контроля параметров и типа применяемой для этой цели вспомогательной контрольно-измерительной аппаратуры. Укажем на то, что использование систем автоматического контроля параметров позволяет значительно ускорить проведение технического обслуживания аппаратуры (выполнение работ по контролю состояния аппаратуры, профилактическому обслуживанию и ремонту) и избежать появления субъективных ошибок при оценке параметров.

7.11. Трудоемкость ремонтов

Трудоемкость выполнения ремонтов объекта подразделяют на два вида: *средняя суммарная трудоемкость ремонтов и удельная суммарная трудоемкость ремонтов*.

Под средней суммарной трудоемкостью ремонтов понимают математическое ожидание суммарных трудозатрат на все виды ремонтов объекта за определенный период эксплуатации.

Удельной суммарной трудоемкостью ремонтов называют отношение средней суммарной трудоемкости ремонтов к математическому ожиданию суммарной наработки объекта за один и тот же период эксплуатации.

Для количественной оценки трудоемкости ремонтов выберем время, которое расходуется на выполнение всех видов ремонтов.

В этом случае средняя суммарная трудоемкость ремонтов будет определяться по следующей формуле:

$$T_{\text{срп}}(t) = T_{\text{р1}} n_p(t), \quad (7.51)$$

где $n_p(t)$ – математическое ожидание числа ремонтов за период эксплуатации t ; $T_{\text{р1}}$ – средняя продолжительность времени одного ремонта объекта.

Среднее время одного ремонта объекта $T_{\text{р1}}$ статистически может быть определено по формуле

$$T_{\text{р1}}^* = \frac{\sum_{i=1}^N t_{\text{рср}i}^*}{N}, \quad (7.52)$$

где

$$t_{\text{рср}i}^* = \frac{\sum_{j=1}^{n_{\text{р1}}} t_{\text{рj}}}{n_{\text{р1}}}, \quad (7.53)$$

где $t_{\text{рср}i}^*$ – среднее время одного ремонта в i -м объекте;

$t_{\text{рj}}$ – время j -го ремонта в i -м объекте;

$n_{\text{р1}}$ – число ремонтов i -го объекта за рассматриваемый период эксплуатации.

Периоды эксплуатации могут отличаться для различных объектов. Математическое ожидание числа ремонтов объекта за период эксплуатации t статистически определяется по формуле

$$n_p^*(t) = \frac{\sum_{i=1}^N n_{\text{р1}}}{N}, \quad (7.54)$$

где $n_{\text{р1}}$ – число ремонтов i -го объекта за период эксплуатации t ; N – число наблюдаемых объектов.

В соответствии с приведенным определением удельная суммарная трудоемкость ремонтов может быть рассчитана с помощью следующего выражения:

$$T_{\text{усп}} = \frac{T_{\text{срсп}}(t)}{T_{\Sigma}(t)}, \quad (7.55)$$

где $T_{\Sigma p}(t)$ – средняя суммарная трудоёмкость ремонтов за период эксплуатации t , которая определяется по формуле (7.51); $T_{\Sigma}(t)$ – математическое ожидание суммарной наработки объекта за один и тот же период эксплуатации t , которое рассчитывается по формуле (7.50).

7.12. Коэффициент технического использования

При рассмотрении эксплуатационного показателя *коэффициента готовности* не учитывалось время простоя аппаратуры (объекта), которое затрачивается на выполнение ее технического обслуживания (профилактического обслуживания). Ясно, что это время оказывает влияние на готовность аппаратуры для выполнения основных функций при ее использовании по назначению. Поэтому кроме коэффициента готовности, который учитывает такие эксплуатационные качества, как безотказность (наработку на отказ) и ремонтпригодность (среднее время восстановления), пользуются более общим показателем *коэффициентом технического использования*, который позволяет дополнительно учесть и техническое (профилактическое) обслуживание аппаратуры (трудоёмкость технического обслуживания).

Коэффициент технического использования

$$K_{\text{ти}}(t) = \frac{T_{\Sigma}(t)}{T_{\Sigma}(t) + n_p(t)T_B + m(t)T_{np}}, \quad (7.56)$$

где $T_{\Sigma}(t)$ – математическое ожидание времени пребывания объекта в работоспособном состоянии за период эксплуатации t , определяемое по формуле (7.48);

T_B – среднее время восстановления (ремонта), определяемое по формуле (7.33);

n_p – математическое ожидание числа ремонтов (отказов) объекта за тот же период эксплуатации t (7.54);

T_{np} – среднее время одного технического (профилактического) обслуживания; $m(t)$ – математическое ожидание числа технических обслуживаний за один и тот же период эксплуатации.

Статистически показатели T_{np} и $m(t)$ могут быть определены по формулам (7.33) и (7.54), если в них подставить вместо времени ремонта t_{B_i} время технического обслуживания t_{oi} и вместо числа ремонтов n_{p_i} число технических обслуживаний i -го объекта за период эксплуатации t n_{ioi} .

Коэффициент технического использования статистически определяется отношением суммарного времени пребывания наблюдаемых объектов в работоспособном состоянии к произведению числа наблюдаемых объектов на заданное время эксплуатации;

$$K_{м.у.}^* = \frac{\sum_{i=1}^N t_i}{NT_{рабл}}, \quad (7.57)$$

где $T_{рабл}$ – продолжительность эксплуатации, состоящая из интервалов, времени работы, восстановления и технического обслуживания. Если заданное время эксплуатации $T_{рабл}$ различно для каждого объекта, то для расчета $K_{м.у.}^*$ можно воспользоваться следующей формулой:

$$K_{м.у.} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{\sum_{i=1}^n t_i + \sum_{i=1}^n t_{Bi} + \sum_{j=1}^m t_{пр\Sigma j}}, \quad (7.58)$$

где t_i – случайное время исправной работы между $(i-1)$ -м и i -м отказами; t_{Bi} – случайное время восстановления аппаратуры при i -м отказе; $t_{пр\Sigma j}$ – случайное время, затраченное на выполнение i -й профилактики; n – количество отказов аппаратуры за суммарное время работы $t_{р\Sigma} = \sum_{i=1}^n t_i$; здесь не учитываются отказы, устраненные при профилактике; m – количество профилактических обслуживаний за период эксплуатации t .

Разделив числитель и знаменатель соотношения (7.58) на число отказов n , получим

$$K_{Т.И} = \frac{T}{T + T_B + T'_{пр}}, \quad (7.59)$$

где $T = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n}$ – наработка на отказ;

$T_B = \frac{\sum_{i=1}^n t_{Bi}}{n}$ – среднее время восстановления;

$$T'_{пр} = \frac{\sum_{j=1}^m t_{пр\Sigma j}}{n} \quad (7.60)$$

$T'_{пр}$ – средний объем профилактики (среднее время профилактических работ), приходящийся на один отказ аппаратуры.

Выражение (7.60) можно записать в виде

$$T'_{\text{пр}} = \frac{\sum_{j=1}^m t_{\text{пр}\Sigma j}}{n} \cdot \frac{m}{n} = \frac{m}{n} T_{\text{пр}}, \quad (7.61)$$

где $T_{\text{пр}}$ – среднее время выполнения одной профилактики.

Как следует из выражений (7.56) – (7.61), коэффициент технического использования позволяет оценить совокупность таких качеств, как безотказность T , ремонтно-пригодность (восстанавливаемость) T_0 и обслуживаемость $T_{\text{пр}}$ аппаратуры (объекта). Коэффициент технического использования показывает, какое среднее относительное время аппаратура находится в исправном состоянии. Если имеется несколько одинаковых объектов, то величина $K_{i,u}$ – показывает средний процент систем, находящихся в исправном состоянии в любой момент времени, т. е.

$$K_{m,u} = N/N_0, \quad (7.62)$$

где N_0 – общее число систем; N – среднее число исправных систем, не занятых ремонтом и профилактикой.

Показатели $K_{m,u}$ и K_z являются характеристиками готовности аппаратуры для работы под током. Во многих случаях эти две характеристики по внешнему виду совпадают. Например, если в работе аппаратуры под током имеются перерывы (нет необходимости в использовании аппаратуры для решения заданных функций), в течение которых выполняются профилактические работы, не снижающие ее готовность, то это время исключается из выражений (7.56), (7.59) и тогда $K_{m,u}$ и K_z по форме не будут отличаться друг от друга.

По аналогии с характеристикой K_z можно показать, что коэффициент технического использования аппаратуры является стационарным значением вероятности состояния $P_H(t)$ восстанавливаемой аппаратуры в любой момент времени t в предположении простейших потоков отказов и восстановлений с учетом простоев на ремонтных и профилактических работах.

Действительно, исправное состояние объекта в любой момент времени определяется полной вероятностью сложного события и в соответствии с выражениями (140), (139) и (142) вероятность $P_H(t) = K_{\text{вкл}} P_{o,o}(t) + (1 - K_{\text{вкл}}) P_{i,o}(t)$ или

$$P_H(t) = \frac{N_{\text{вкл}}^* \nu_{\Sigma} + \lambda \exp[-(\lambda + \nu_{\Sigma})t]}{N_{0,\text{вкл}} \lambda + \nu_{\Sigma}} + \left(1 - \frac{N_{\text{вкл}}^*}{N_{0,\text{вкл}}}\right) \frac{\nu_{\Sigma} - \nu_{\Sigma} \exp[-(\lambda + \nu_{\Sigma})t]}{\lambda + \nu_{\Sigma}}, \quad (7.63)$$

где $N_{0,\text{вкл}}$ – общее число потребных включений аппаратуры (объектом) для работы под током;

$N_{\text{вкл}}^*$ – число объектов, оказавшихся исправными в момент включения; сюда не входят объекты, находящиеся в ремонте, на профилактике и оказавшиеся неисправными в момент включения;

$K_{\text{вкл}}$ – коэффициент удачного включения аппаратуры, характеризующий средний процент объектов, оказавшихся исправными в момент включения;

$P_{o.o}(t)$ – вероятность исправного состояния аппаратуры в любой момент времени при условии, что она была исправной в момент включения;

$P_{1.0}(t)$ – вероятность исправного состояния аппаратуры в любой момент времени при условии, что она была неисправной в момент включения;

$\lambda = 1/T_0$ – интенсивность отказов объекта;

$\nu_{\Sigma} = 1/(T_{\sigma} + T_{np})$ – суммарная интенсивность восстановлений объекта при ремонте и профилактике.

При $t \rightarrow \infty$, как следует из (7.63), вероятность $P_u(t)$ стремится к стационарному значению, равному коэффициенту технического использования системы:

$$\lim P_u(t) = \frac{\nu_{\Sigma}}{\nu_{\Sigma} + \lambda} = \frac{T}{T + T_B + T_{np}'} = K_{T.и} \quad (7.64)$$

Таким образом, коэффициент технического использования является стационарным значением вероятности исправного состояния восстанавливаемой аппаратуры $P_u(t)$.

Скорость установления стационарного значения вероятности $P_u(t)$ определяется соотношением параметров K_{BKL} , $K_{m.u}$, T , T_{σ} и T_{np} . Анализ выражения (7.63) показывает, что при равенстве $K_{акт} = K_{m.и}$ для любого момента времени $P_u(t) = K_{m.u}$, т. е. в этом случае вероятность исправного состояния объекта не зависит от времени и переходный процесс отсутствует. Если $K_{BKL} = K_{m.и}$, то переходным процессом можно пренебречь. При $K_{акт} \neq K_{m.и}$ вероятность $P_u(t)$ тем быстрее устремляется к своему стационарному значению $K_{m.и}$, чем больше неравенство $T > T_{\sigma} + T_{np}$. При соотношении $T > 10(T_B + T_{np})$ вероятность $P_u(t)$ достаточно быстро устремляется к значению $K_{m.и}$.

Из изложенного следует, что для большинства практических случаев эксплуатации восстанавливаемой аппаратуры можно приближенно считать, что вероятность ее исправного состояния в любой момент времени определяется коэффициентом использования $K_{m.и}$.

Показатель $K_{m.и}$ учитывает простои аппаратуры как за счет ремонта, так и за счет профилактики.

В этом состоит отличие показателя $K_{m.и}$ от показателя K_z (7.46) и (7.59).

7.13. Коэффициент оперативной готовности

Коэффициентом оперативной готовности называют вероятность того, что объект, находясь в режиме ожидания, окажется работоспособным в произвольный момент времени и, начиная с этого момента, будет работать безотказно в течение заданного интервала времени.

Под режимом ожидания понимают нахождение объекта при полной или облегченной нагрузке без выполнения основных (рабочих) функций. При нахождении

объекта в режиме ожидания возможно возникновение отказов и восстановление его работоспособности. Необходимость в использовании объекта возникает внезапно, после чего требуется безотказное выполнение его основных функций в течение требуемой (заданной) наработки T_p . Для выполнения задачи необходимо также, чтобы в момент возникновения необходимости в использовании объект был работоспособен.

Из изложенного следует, что коэффициент оперативной готовности $K_{ог}$ зависит от двух показателей – от коэффициента готовности и вероятности безотказной работы. Если вероятность безотказной работы объекта $P(T_p)$ за требуемую наработку T_p не зависит от начала работы t , то коэффициент оперативной готовности будет определяться по следующей формуле:

$$K_{ог}(T_p) = K_r P(T_p), \quad (7.65)$$

где K_r – коэффициент готовности объекта, рассчитываемый по формуле (7.44); $P(T_p) = e^{-\lambda T_p}$ – вероятность безотказной работы объекта за наработку T_p при простейшем потоке отказов.

Коэффициент оперативной готовности статистически определяется отношением числа объектов, безотказно проработавших в течение заданной наработки T_p при произвольном моменте начала работы каждого из испытываемых (наблюдаемых) объектов, к числу наблюдаемых объектов, т. е.

$$K_{ог}^*(T_p) = \frac{N(t, T_p)}{N}, \quad (7.66)$$

где $N(t, T_p)$ – число объектов, оказавшихся в работоспособном состоянии в произвольный момент времени t и безотказно проработавших в течение заданной (требуемой) наработки T_p ; N – число наблюдаемых объектов.

7.14. Эффективность технического обслуживания

Как уже отмечалось, электронная аппаратура может находиться в двух состояниях: **исправном**, когда аппаратура работает и выполняет свои основные (рабочие) функции, и **неисправном**, когда аппаратура ремонтируется (восстанавливается).

Для повышения безотказности аппаратуры при использовании ее по назначению и продления ресурса предусматривается третье состояние – **технического** (профилактического) обслуживания.

При выполнении профилактических работ (мероприятий) производятся контроль технического состояния аппаратуры, подстройка её параметров, прогнозирование отказов и их предупреждение, устранение отказов и т. д., что позволяет исключить возникновение значительного количества отказов в процессе использования аппаратуры по назначению. Повышение безотказности аппаратуры при выполнении ос-

новых функций за счет проведения профилактических работ (мероприятий) может быть определено с помощью эффективности технического обслуживания (эффективности профилактики) W .

Под эффективностью профилактики понимают отношение наработки на отказ профилактируемой $T_{\text{проф}}$ и непрофилактируемой T аппаратуры:

$$W = \frac{T_{\text{проф}}}{T} \quad (7.67)$$

Эффективность профилактики W позволяет количественно оценить степень повышения безотказности аппаратуры за счет проведения профилактических работ. Прирост наработки на отказ в профилактируемой аппаратуре обусловлен своевременным предотвращением отказов, которые могли бы появиться в ней при работе. Поэтому для оценки эффективности профилактики пользуются и другим параметром — коэффициентом эффективности профилактики $K_{\text{э.пр}}$.

Под коэффициентом эффективности профилактики понимают отношение количества отказов $n_{\text{в. пр}}$, выявленных во время выполнения профилактируемых работ, к полному числу отказов n_n , зарегистрированных в процессе эксплуатации аппаратуры:

$$K_{\text{э.пр}} = \frac{n_{\text{в. пр}}}{n_n} \quad (7.68)$$

$$n_n = n_{\text{в. пр}} + n, \quad (7.69)$$

где n — число отказов, возникших в процессе работы аппаратуры.

Если предположить, что потоки отказов в профилактируемой и непрофилактируемой аппаратуре являются простейшими, то эффективность профилактики W (7.67) можно представить в виде

$$W = \frac{T_{\text{проф}}}{T} = \frac{tn_n}{nt} = \frac{n_n}{n} \quad (7.70)$$

где t — суммарное время работы аппаратуры, в течение которого зафиксировано n_n отказов.

Преобразуем выражение (7.70) с учетом (7.68), (7.69):

$$\left. \begin{aligned} W &= \frac{n_n}{n} = \frac{n + n_{\text{в. пр}}}{n} = 1 + WK_{\text{э.пр}} \\ \text{или} \\ W &= \frac{1}{1 - K_{\text{э.пр}}} \end{aligned} \right\} \quad (7.71)$$

Показатели «эффективность профилактики» и «коэффициент эффективности профилактики» (7.60), (7.68), (7.70), (7.71) позволяют количественно оценить повышение надежности аппаратуры при проведении профилактических мероприятий,

7.15. Коэффициент стоимости эксплуатации

Экономическая оценка эксплуатационных свойств аппаратуры производится с помощью коэффициента стоимости эксплуатации.

Под коэффициентом стоимости эксплуатации понимают отношение стоимости эксплуатации аппаратуры в течение года к стоимости ее производства:

$$K_{с.э.} = \frac{C_{э}}{C_{п}} = \frac{C_0 + C_{р.с.} + C_x + C_a}{C_{п}}, \quad (7.72)$$

где C_0 – средняя стоимость устранения всех отказов (замены отказавших деталей) за один год; $C_{р.с.}$ – стоимость рабочей силы в течение года, занимающейся ремонтом и профилактическим обслуживанием аппаратуры; C_x – стоимость ЗИПа, вспомогательной аппаратуры, инструмента и расходных материалов за один год; C_a – административные расходы в течение одного года; C_n – стоимость разработки и производства аппаратуры.

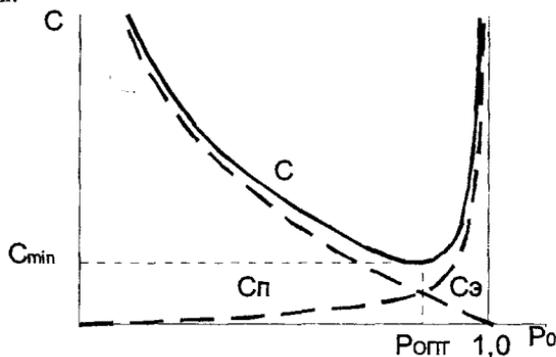


Рис. 7.5. Зависимость суммарной стоимости от надежности изделия

Экономическая оценка эксплуатационных свойств аппаратуры очень важна при обосновании требований к ее надежности.

Известно, что создание более надежной аппаратуры требует дополнительных экономических затрат, при ее производстве C_n . Увеличение стоимости производства, связанное с повышением надежности, составляет затраты на разработку, специальные испытания и отбор более надежных деталей, на обеспечение разгружен-

ных режимов за счет выбора большого коэффициента запаса по нагрузке, на резервирование отдельных узлов и элементов аппаратуры, на системы контроля работоспособности аппаратуры и прогнозирования отказов, на расходы по содержанию служб и лабораторий надежности и на другие мероприятия, обеспечивающие повышение надежности.

Но при этом необходимо учитывать, что увеличение первоначальной стоимости аппаратуры C_n , связанное с повышением ее надежности, приводит, как правило, к снижению стоимости ее эксплуатации, так как более надежная (безотказная) аппаратура требует меньших эксплуатационных расходов $C_э$,

Поэтому при обосновании требований к надежности (при ее оптимизации) по экономическому показателю следует исходить из суммарной стоимости экономических затрат, связанных с производством и эксплуатацией аппаратуры:

$$C = C_n + C_э \quad (7.73)$$

На рис. 7.5. показана зависимость суммарной стоимости (7.73) от надежности P_o . Из рис. 7.5. понятно, что с ростом надежности стоимость аппаратуры C_n возрастает, а составляющая эксплуатационных расходов $C_э$, при этом уменьшается. Минимальное значение суммарной стоимости экономических затрат C_{min} имеет минимум, соответствующий оптимальному значению надежности по экономическому показателю.

ГЛАВА 8. Основы теории ремонтпригодности ЭиВС при эксплуатации

8.1. Ремонтпригодность ЭиВС и факторы, влияющие на нее

До настоящего времени при проектировании радиоэлектронной аппаратуры в первую очередь стремятся обеспечить требования к их техническим характеристикам, а вопросы технического обслуживания аппаратуры рассматриваются как второстепенные.

Если раньше ввиду простоты аппаратуры и небольшого числа комплектующих элементов отказы в устройствах происходили значительно реже, и восстановление работоспособного состояния ее не представляло больших трудностей, то теперь картина резко изменилась.

В современной радиоэлектронной аппаратуре рост количества комплектующих элементов опережает рост их безотказности, что приводит к уменьшению среднего времени безотказной работы и увеличению времени вынужденного простоя аппаратуры. Поэтому приходится уделять особое внимание ремонтпригодности как одной из наиболее трудных проблем обеспечения надежности радиоэлектронной аппаратуры.

Как известно, надежность электронной аппаратуры наиболее полно определяется безотказностью и ремонтпригодностью. Безотказность характеризуется закономерностями появления отказов, а ремонтпригодность – закономерностями их предупреждения и устранения.

Ремонтпригодность так же, как и безотказность, зависит от организации эксплуатации и от свойств аппаратуры.

Низкая ремонтпригодность снижает коэффициенты готовности и использования аппаратуры, а также приводит к большим расходам на ее обслуживание. Иногда расходы на обслуживание аппаратуры во время эксплуатации ввиду низкой ремонтпригодности в десять раз превышают ее первоначальную стоимость

Обеспечение ремонтпригодности аппаратуры – это предусмотренный комплекс мероприятий, проводимый при проектировании, разработке (производстве) и эксплуатации аппаратуры, обеспечивающий сокращение продолжительности технического обслуживания и экономических затрат, облегчающий техническое обслуживание аппаратуры персоналом, имеющим среднюю квалификацию, при нормальных условиях эксплуатации.

Ремонтпригодность радиоэлектронной аппаратуры определяется рядом факторов, которые можно разделить на четыре основные группы: *конструктивные, организационные, условия эксплуатации и материально-техническое обеспечение.*

К конструктивным факторам относится такой, как *сложность* аппаратуры. Чем сложнее аппаратура, тем больше содержит она элементов, тем чаще появляются в ней отказы, тем дольше они устраняются и тем длительнее ее профилактическое обслуживание.

Несмотря на возрастающую сложность электронной аппаратуры при ее проектировании и производстве, можно осуществить мероприятия, повышающие ремонтнопригодность.

К числу таких мероприятий следует отнести *маркировку*. Маркировка элементов позволяет в полтора — два раза сократить время поиска отказавшего элемента.

На время такого поиска непосредственно влияют *индикация неисправности* в узле, блоке, наличие *контрольных точек* для замера параметров аппаратуры и *контрольно-испытательная аппаратура*.

От конструктивных особенностей аппаратуры зависит не только время поиска отказавшего элемента, но и время его замены.

Время замены элемента в основном зависит от его доступности. При недостаточной доступности к элементам схемы обслуживающий персонал вынужден пользоваться приборами и инструментами, находясь в неудобном положении (сидя на корточках или стоя на коленях). Это вызывает физическую усталость, которая увеличивает время проведения всех видов работ. Для обеспечения нормальной работы около закрытой радиоэлектронной аппаратуры требуется пространство порядка 0,9 м³.

Время замены элемента зависит еще от особенностей *крепления элементов, конструкции разъемов, веса и объема съемных элементов*.

Часто отказы аппаратуры устраняют благодаря, регулировкам при профилактическом обслуживании. В связи с этим на ремонтнопригодность аппаратуры влияют конструкция органов регулировки и их размещение.

К *организационным факторам* относятся: подготовка обслуживающего персонала, наличие и качество технической документации по эксплуатации аппаратуры; организация технического обслуживания и способы использования аппаратуры.

Подготовка обслуживающего персонала существенно влияет на время проведения технического обслуживания. За счет специального обучения обслуживающего персонала поиску и устранению отказов в аппаратуре время простоя аппаратуры при текущем ремонте сократить в несколько раз. Недельная тренировка в поиске и устранении отказов позволяет сократить среднее время восстановления аппаратуры на 30% [8, 11].

Важное значение при проведении технического обслуживания имеет *техническая документация* по эксплуатации аппаратуры (инструкции, руководства, описания аппаратуры) и ее качество. Хорошая разработка технической документации снижает требования к квалификации обслуживающего персонала, позволяет быстро и правильно производить необходимые работы при техническом обслуживании аппаратуры. В этих документах должны помещаться: алгоритмы поиска неисправных элементов, трактовые схемы, карты напряжений и сопротивлений, указания по измерению параметров схем, указания по замене и регулировке отдельных элементов, указания по смазке и т. д.

Организация технического обслуживания аппаратуры непосредственно влияет на ремонтнопригодность аппаратуры. Так, плохая организация технического обслуживания аппаратуры может свести к нулю все мероприятия, проводимые по повышению ремонтнопригодности аппаратуры при ее конструировании и производстве.

Например, если для технического обслуживания аппаратуры выделено недостаточное количество обслуживающего персонала, то время ожидания обслуживания может превысить время непосредственного обслуживания.

Способ использования аппаратуры также имеет большое значение для повышения ремонтпригодности. Например, если аппаратура работает непрерывно, то ее отказ обычно устанавливается своевременно, и его устранение начинается сразу после обнаружения. Если же аппаратура предназначена для кратковременного применения, и ее исправность не проверяется до использования, то длительное время аппаратура может находиться в неисправном состоянии, т. е. неготовой к применению.

Изложенное свидетельствует о том, что от способа использования аппаратуры и организации ее применения зависят время пребывания аппаратуры в исправном состоянии и время ее профилактического обслуживания.

К факторам условий эксплуатации относятся: *окружающая среда* (температура, влажность, атмосферное давление); *размещение аппаратуры* (вибрации, толчки,); *условия работы обслуживающего персонала* (освещенность, акустические шумы и др.). Эти факторы влияют на время технического обслуживания.

При более сложных условиях эксплуатации аппаратуры увеличивается объем профилактического и текущего обслуживания, а также время проведения определенных операций обслуживающим персоналом.

В сложных условиях эксплуатации помимо отказов, обусловленных свойством аппаратуры, появляется 20-50% отказов по вине обслуживающего персонала.

Группа факторов *материально-технического обеспечения* (наличие инструмента, запасных элементов и вспомогательных принадлежностей) оказывает значительное влияние на время обслуживания и, следовательно, на ремонтпригодность.

Время простоя аппаратуры при отсутствии необходимого элемента, инструмента или вспомогательной принадлежности непосредственно входит во время технического обслуживания, т. е. в основной критерий оценки ремонтпригодности.

8.2. Техническое обслуживание. Методы текущих ремонтов ЭиВС

Техническое обслуживание аппаратуры осуществляют с целью восстановления потерянного качества работы аппаратуры.

Потеря качества работы аппаратуры обуславливается сроком работы, внешними условиями, интенсивностью эксплуатации и т. п.

В результате технического обслуживания аппаратура поддерживается в работоспособном состоянии или возвращается к нему, если оно было потеряно.

Техническое обслуживание проводится либо до обнаружения неисправности (профилактическое обслуживание), либо после (текущее обслуживание).

Профилактическое обслуживание предусматривает действия, выполняемые для предупреждения отказов при целевом использовании аппаратуры, т. е. для предупреждения текущего технического обслуживания.

Текущее техническое обслуживание (ремонт) предусматривает действия, необходимые для приведения аппаратуры в работоспособное состояние, после того как нарушилось выполнение одной или нескольких существенных функций аппаратуры.

Профилактические мероприятия разрабатываются на основе анализа неисправностей и их симптомов (сбоев и т.п.).

Если такие симптомы появляются периодически, то определяется период появления, и профилактические мероприятия проводятся периодически, независимо от их появления. Если они появляются нерегулярно, то сигналом для проведения профилактики служит появление симптома.

Техническое обслуживание может производиться как со снятием аппаратуры с работы по целевому назначению, так и без снятия. Предпочтительнее последнее, однако, это экономически не всегда целесообразно, так как в данном случае требуется резерв систем, на которых можно производить профилактику.

При техническом обслуживании аппаратуры предполагается проведение ремонта: текущего и восстановительного. Текущий ремонт осуществляется во время текущего технического обслуживания, восстановительный – во время профилактического обслуживания.

При ремонте электронной аппаратуры различают четыре метода:

- 1) ремонт методом замены и последующего восстановления;
- 2) ремонт методом замены невосстанавливаемого элемента;
- 3) ремонт при наличии резервирования;
- 4) замена текущего ремонта профилактическим обслуживанием.

При эксплуатации электронной аппаратуры ни один из методов в чистом виде не применяют. Чаще всего используют комбинацию из нескольких методов.

Ремонт методом замены и последующего восстановления агрегата, узла, блока, модуля применяется в целях повышения готовности аппаратуры. Иногда данный метод называют модульным. Время неработоспособного состояния аппаратуры при этом значительно сокращается, так как отыскание неисправного блока намного проще, чем отыскание неисправного элемента схемы, а время замены сводится к времени замены блока. Однако целесообразность применения указанного метода зависит от соотношения средств, получаемых в результате повышения готовности и теряемых на увеличении стоимости запасных элементов за счет большого числа дорогостоящих запасных блоков, модулей, узлов.

Ремонт методом замены невосстанавливаемого элемента. До недавнего времени к восстанавливаемым элементам электронной аппаратуры относились резисторы, конденсаторы и полупроводниковые приборы. В настоящее время все больше применяют такие невосстанавливаемые элементы, как платы с печатным монтажом, опрессованные модули и т. п. Применение указанных элементов дает ряд выгод: меньший расход времени на отыскание и замену отказавшего элемента, возможность использования менее квалифицированного обслуживающего персонала (так как нет необходимости в восстановлении элемента), уменьшение поломок во время ремонта, обеспечение доступности без ущерба для плотности компоновки внутри невосстанавливаемого элемента. При желании использовать такой метод ре-

монта и сократить расходы на его проведение возникает задача определения оптимального размера (состава) невосстанавливаемого элемента.

Известно, что замена модулей экономически выгоднее их восстановления и в дальнейшем ожидается более значительное использование ремонта методом замены невосстанавливаемых модулей по сравнению с ремонтом методом восстановления. Замена отказавших модулей в сочетании с встроенным устройством индикации неисправностей почти исключает необходимость в высококвалифицированном обслуживающем персонале.

Модульная конструкция более оправдана для сложной аппаратуры.

Ремонт при наличии резервирования можно рассматривать как разновидность ремонта без снятия выполняемых функций аппаратурой. Вместо снятия неисправного элемента и установления запасного, последний элемент устанавливают заранее, а фактическую работу по устранению неисправности откладывают до какого-то момента в будущем. Такое обеспечение готовности аппаратуры и соответствующий ему метод ремонта требуют больших расходов.

Замена текущего ремонта профилактическим обслуживанием является весьма интересным методом ремонта. Для оценки возможностей профилактического обслуживания целесообразно отказы аппаратуры разделить на два вида: профилактируемые и непрофилактируемые. *Профилактируемыми* отказами являются те, которые можно предотвратить в процессе профилактики, остальные – *непрофилактируемые* отказы.

К профилактируемым отказам относятся почти все постепенные и часть внезапных, закон распределения времени безотказной работы, которых является функцией наработки элемента, т. е. наличие последствия.

Постепенные отказы характеризуются медленным изменением значения параметра, на который они влияют. Если представить изменение математического ожидания параметра в виде линейной функции

$$\bar{\beta}(t) = \bar{\beta}_0 - a_n t, \quad (8.1)$$

где $\bar{\beta}(t)$ - математическое ожидание значения параметра в момент времени t ;

$\bar{\beta}_0$ - значение $\bar{\beta}(t)$ в момент $t=0$;

a_n - скорость изменения математического ожидания, а среднее квадратическое отклонение σ считать постоянной величиной, то при нормальном законе распределения параметра плотность распределения его примет вид

$$f[\beta(t)] = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{[\bar{\beta}(t) - (\beta_0 - a_n t)]^2}{2\sigma^2} \right] \quad (8.2)$$

Внезапным отказам обычно не предшествуют изменения параметров, и для их предотвращения нет симптомов. Решение об их предотвращении принимается, исходя из знания закона распределения времени их безотказной работы как функции времени наработки.

Без знания закона распределения времени безотказной работы элемента нельзя обоснованно принимать решение на профилактическую его замену. Практика сплошной замены некоторых элементов по истечении определенного срока работы, которая имела место при эксплуатации аппаратуры, являлась порочной, ибо она не базировалась на закономерности отказов элементов, и, следовательно, не столько предупреждала отказы, сколько приводила к ним.

В табл. 8.1 [3] приведена доля профилируемых отказов в процентах для некоторых групп элементов.

Таблица 8.1

Доля профилируемых отказов

Группа элементов	Доля профилируемых отказов, %
Интегральные схемы	30 – 50
Полупроводниковые приборы	40 – 60
Резисторы, конденсаторы	50 – 60
Электромоторы	40 – 60
Реле, переключатели	40 - 50

Оценку аппаратуры с точки зрения ее потенциальной профилактичности (возможности профилактики) удобно производить, используя коэффициент профилактичности:

$$\eta_{\text{ПР}} = n_{\text{ПР}} / n = n_{\text{ПР}} / (n_{\text{ПР}} + n_{\text{Н.ПР}}), \quad (8.3)$$

где $n_{\text{ПР}}$, $n_{\text{Н.ПР}}$ - количество профилируемых и непрофилируемых отказов за определенный период времени; n - общее число отказов аппаратуры за этот период времени.

Коэффициент профилактичности аппаратуры может быть определен по статистическим данным отказов непрофилируемой аппаратуры.

При проведении профилактического обслуживания не удается предотвратить все отказы. Для оценки эффективности профилактики вводят коэффициент эффективности профилактических работ

$$K_{\text{Э.ПР}} = \frac{n_{1\text{ПР}}}{n} = \frac{n_{1\text{ПР}}}{n_{1\text{ПР}} + n_{2\text{ПР}} + n_{\text{Н.ПР}}} = \eta_{\text{ПР}} P_{\text{ПР}}, \quad (8.4)$$

где $n_{1\text{ПР}}$, $n_{2\text{ПР}}$ - количество предотвращенных и не предотвращенных профилируемых отказов; $P_{\text{ПР}}$ - вероятность предотвращения профилируемого отказа;

$$P_{\text{ПР}} = n_{1\text{ПР}} / (n_{1\text{ПР}} + n_{2\text{ПР}}) = n_{1\text{ПР}} / n_{\text{ПР}} \quad (8.5)$$

Вероятность предотвращения профилируемых отказов зависит от качества аппаратуры, прогнозирования отказов, периодичности профилактических работ и тщательности их проведения, которая зависит от времени и квалификации обслуживающего персонала.

Из выражения (8.5) следует, что коэффициент профилактичности аппаратуры численно равен максимальному значению коэффициента эффективности профилактики, который всегда меньше единицы (см. табл. 8.1).

Таким образом, профилактическое обслуживание не может полностью заменить текущий ремонт, и степень возможной замены текущего ремонта характеризуется коэффициентом эффективности профилактики.

Следует иметь в виду, что в процессе проведения профилактики обслуживающий персонал нередко вводит неисправности, тем самым уменьшает преимущества профилактического обслуживания.

Экономически обоснованное решение о применении профилактического обслуживания должно приниматься при выполнении следующего неравенства:

$$C_{\text{пр}} < [S_{\text{г}} + S_{\text{т.р}} - (C_{\text{т.р}} + C_{\text{г}})], \quad (8.6)$$

где $C_{\text{пр}}$ – затраты на профилактику; $S_{\text{г}}$ – экономия, достигнутая благодаря повышению безотказности (готовности); $S_{\text{т.р}}$ – экономия на текущем ремонте и содержании аппаратуры; $C_{\text{т.р}}$ – затраты на удержание аппаратуры с учетом текущего ремонта; $C_{\text{г}}$ – затраты на поддержание безотказности (готовности) с учетом текущего ремонта.

8.3. Распределение времени текущего ремонта

При осуществлении текущего ремонта аппаратуры различают четыре этапа:

- 1) установление наличия неисправности;
- 2) установление характера отказа и отыскание неисправного элемента;
- 3) устранение неисправности;
- 4) проверка аппаратуры после ремонта.

Все указанные этапы ремонта являются общими для всех ранее перечисленных методов ремонта независимо от метода отыскания отказа – автоматический или ручной. Можно предположить, что и дальнейшее усовершенствование методов ремонта аппаратуры не приведет к изменению данных этапов. При сопоставлении методов ремонта аппаратуры распределение общего времени текущего ремонта можно анализировать по этапам ремонта. При ручном поиске отказавших элементов и ремонте методом замены невосстанавливаемого элемента для блочной конструкции аппаратуры соотношение времени по этапам ремонта примерно следующее:

- 1) установление наличия неисправности - 3% общего времени ремонта;
- 2) установление характера отказа и отыскание неисправного элемента - 61%;
- 3) устранение неисправности - 15%;
- 4) проверка аппаратуры после ремонта - 21%.

Каждый этап ремонта аппаратуры связан с определенными действиями (операциями) человека или машины.

При проведении текущего ремонта человек, ремонтирующий аппаратуру, осуществляет следующие операции:

- а) осмотр и наблюдение;
- б) консультации с обслуживающим персоналом;
- в) получение (со склада) и установка испытательного оборудования, приборов и инструмента;
- г) чтение технических описаний, инструкций по эксплуатации и другой технической документации;
- д) подсоединение и отсоединение испытательного оборудования и приборов;
- е) испытание и измерение;
- ж) сборка или разборка;
- з) обеспечение доступности;
- и) чистка и смазка;
- к) удаление, замена или восстановление неисправного элемента;
- л) получение материалов и элементов для замены;
- м) съем и обратная установка блоков, модулей;
- н) регулировка;
- о) ожидание ремонта ввиду отсутствия необходимых материалов, элементов или документов;
- п) запись результатов измерений.

Многие из перечисленных операций могут встретиться на каждом этапе ремонта. Однако имеется ряд операций, которые типичны только для определенного этапа ремонта, например: чистка и смазка; удаление, замена или восстановление неисправного элемента; получение материалов и элементов для замены, которые типичны для этапа устранения неисправности.

Учет времени, затрачиваемого на производство каждой операции, и последующий анализ полученных временных соотношений позволяют наметить правильные пути сокращения времени текущего ремонта применением рациональной методики ремонта и автоматизации отдельных операций ремонта.

С точки зрения использования времени ремонта можно разделить на *активное, административное и время снабжения*.

Активное время ремонта – это часть времени ремонта, которая тратится на операции, проводимые непосредственно на аппаратуре.

Административное время составляет время ожидания ремонта.

Время *снабжения* определяется операциями, связанными с получением материалов, оборудования, приборов, элементов и инструментов.

Такое деление ремонтного времени на три составляющие помогает выявить административные и снабженческие ошибки в организации текущего ремонта. Иногда простой аппаратуры при ремонте из-за плохой организации в несколько раз превышает активное время ремонта.

Время устранения неисправности может быть различно для одного и того же ремонта. Причин различных значений времени устранения абсолютно идентичных не-

исправностей можно привести довольно много: различная квалификация и опыт обслуживающего персонала, различные условия устранения неисправности (температура, давление, квалификация обслуживающего персонала), различные конструкции узлов (доступность, наличие контрольных гнезд и др.) и т. д.

В общем случае время устранения неисправности является случайной величиной, которая наиболее полно описывается законом ее распределения.

Закон распределения активного времени ремонта в основном определяется методом отыскания неисправностей и конструкцией аппаратуры. Если аппаратура модульного типа и ремонт осуществляется заменой модуля, то имеет место экспоненциальный закон распределения времени ремонта. Этот закон справедлив и для относительно простой аппаратуры.

В ряде случаев, когда поиск отказов производится вручную, закон распределения времени текущего ремонта отличается от закона экспоненциального.

8.4. Поиск неисправных элементов в ЭиВС

При поиске отказов под элементом аппаратуры условимся понимать такую самостоятельную конструктивную часть, которая в случае наличия в ней неисправности полностью заменяется.

В 8.3 было показано, что порядка 61% активного времени текущего ремонта расходуется на поиск неисправного элемента.

Отыскание неисправности – это медленный и утомительный процесс даже для опытного обслуживающего персонала. Поэтому разработка мер по упрощению отыскания неисправности сокращает не только основную долю времени активного ремонта, но и уменьшает физическую и умственную нагрузку обслуживающего персонала.

К мерам по упрощению отыскания неисправностей в первую очередь относится автоматизация этого процесса. Однако следует критически подходить к использованию автоматических систем отыскания неисправностей и применять их тогда, когда затраты на создание и эксплуатацию сложных и дорогостоящих самих по себе систем оправдываются повышением ремонтоспригодности аппаратуры.

Независимо от применяемых средств поиск отказавшего элемента имеет две стадии:

- 1) выбор последовательности проверки элементов;
- 2) выбор методики (способа) проведения отдельных операций проверки.

Выбор той или иной последовательности проверки и методики проведения отдельных операций зависит от конструкции аппаратуры или ее части, в которой появился отказ, и может меняться в соответствии с особенностями аппаратуры и имеющейся информации по надежности и трудоемкости проверки элементов.

При проведении проверки исправности элементов независимо от ее последовательности постепенно приближаются к отказавшему элементу. Результат проверки одного элемента позволяет исключить из рассмотрения, по крайней мере, одну из

возможных неисправностей. В некоторых случаях в результате одной проверки исключаются $n - 1$ возможных неисправностей, т. е. сразу же определяется неисправный элемент. Каждая проверка очередного элемента ограничивает область аппаратуры, подлежащую последующей проверке. В этом смысле закономерность проверок элементов основывается на методе последовательного приближения. Все умение в отыскании неисправностей заключается в меньшем расходе времени, которое определяется как последовательностью проведения проверок элементов, так и методикой проведения этих проверок.

Для определения оптимальной последовательности проверки элементов рассмотрим следующую математическую модель процесса поиска отказавшего элемента.

Аппаратура, в которой появилась неисправность, состоит из n - элементов. Отказы элементов независимы. При отказе любого из элементов отказывает аппаратура. Для контроля исправности элемента имеется возможность подать на его вход контрольный сигнал и проверить на выходе реакцию на этот сигнал. Известны интенсивности отказов элементов и время на проверку их исправности. Необходимо определить последовательность проверок элементов, обеспечивающую наименьшее время поиска неисправности.

Пусть нумерация элементов производится в порядке проверки их исправности. Тогда среднее время поиска неисправности в рассматриваемой схеме будет

$$T_{п.н} = \sum_{i=1}^{n-1} q_i t_{п.нi}, \quad (8.7)$$

где $t_{п.нi}$ - среднее время, затраченное на поиск, при отказе i -го элемента; q_i - условная вероятность отказа i -го элемента при условии отказа схемы

В свою очередь

$$t_{п.нi} = \sum_{j=1}^i \tau_j, \quad (8.8)$$

где τ_j - среднее время проверки исправности j -го элемента;

$$q_i = \frac{\lambda_i}{\sum_{j=1}^n \lambda_j}, \quad (8.9)$$

где λ_j - интенсивность отказов j -го элемента.

Таким образом,

$$T_{п.н} = \sum_{i=1}^{n-1} q_i \sum_{j=1}^i \tau_j \quad (8.10)$$

Пусть исходная последовательность проверок исправности элементов будет такова и определяться,

$$T_{П.Н.} = \sum_{i=1}^{k-1} q_i \sum_{j=1}^i \tau_j + q_k \left(\tau_k + \sum_{j=1}^{k-1} \tau_j \right) + q_{k+1} \left(\tau_k + \tau_{k+1} + \sum_{j=1}^{k-1} \tau_j \right) + \sum_{i=k+2}^{n-1} q_i \sum_{j=1}^i \tau_j \quad (8.11)$$

Образует вторую последовательность отличную от первой тем, что сначала проверяется $k+1$ -й элемент, а затем k -й. Эта последовательность образуется из первой заменой q_n и τ_k соответственно на q_{k+i} и τ_{k+i} , т. е. $q_k \leftrightarrow q_{k+1}$, $\tau_k \leftrightarrow \tau_{k+1}$, тогда

$$T_{П.Н.2} = \sum_{i=1}^{k-1} q_i \sum_{j=1}^i \tau_j + q_{k+1} \left(\tau_{k+1} + \sum_{j=1}^{k-1} \tau_j \right) + q_k \left(\tau_{k+1} + \tau_k + \sum_{j=1}^{k-1} \tau_j \right) + \sum_{i=k+1}^{n-1} q_i \sum_{j=1}^i \tau_j \quad (8.12)$$

Определим, в каком случае вторая последовательность обеспечивает меньшее время поиска неисправности. Это условие можно записать в виде

$$T_{П.Н.1} - T_{П.Н.2} > 0 \quad (8.13)$$

После вычитания (8.12) из (8.11) и учета (8.13) получим

$$q_{k+1} \tau_k - q_k \tau_{k+1} > 0 \quad (8.14)$$

или

$$\frac{\tau_k}{q_k} > \frac{\tau_{k+1}}{q_{k+1}} \quad (8.15)$$

Из (8.15) следует, что вторая последовательность обеспечивает меньшее время поиска неисправности только в том случае, когда отношение среднего времени контроля исправности элемента к его условной вероятности отказа меньше, чем указанное отношение в первой последовательности.

Таким образом, оптимальная последовательность должна обладать следующим свойством:

$$\frac{\tau_1}{q_1} < \frac{\tau_2}{q_2} < \dots < \frac{\tau_{n-1}}{q_{n-1}} \quad (8.16)$$

Если времена контроля исправности всех элементов равны, то оптимальная последовательность принимает вид

$$q_1 > q_2 > \dots > q_{n-1}, \quad (8.17)$$

т. е. контроль исправности элементов следует производить в порядке убывания условной вероятности отказов элементов.

Последовательность (8.17) можно записать в более удобном виде:

$$\lambda_1 > \lambda_2 > \dots > \lambda_{n-1} \quad (8.18)$$

Рассмотренная модель предполагала, что для проверки исправности элемента на его вход подается контрольный сигнал. Такая организация поиска неисправности не всегда является рациональной, ибо требует большого разнообразия контрольных сигналов. В реальных электронных схемах имеется возможность использовать один или несколько контрольных сигналов для проверки исправности большого количества элементов. Это явление наиболее типично для схемы, состоящей из последовательно соединенных элементов.

Пусть имеется схема, состоящая из n последовательно соединенных элементов. На вход первого элемента поступает контрольный сигнал и известны реакции этого сигнала на выходах каждого из элементов и интенсивности отказов элементов. В схеме имеется один отказавший элемент. Требуется определить оптимальную процедуру проверки исправности элементов схемы с целью выявления неисправного при условии, что времена проверок всех элементов одинаковы.

В исходном состоянии отказ может находиться в любом из n элементов. Следовательно, энтропия (неопределенность) состояния схемы составит меру

$$H = -\sum_{i=1}^n q_i \log_2 q_i \quad (8.19)$$

Так как сигнал поступает только на вход всей схемы, то для поиска неисправности последовательно решается задача, в какой из частей схемы находится неисправность. С этой целью измеряется реакция на контрольный сигнал в одной из точек схемы. Если реакция соответствует требуемой, то делается вывод, что неисправной является последующая часть схемы, в противном случае наоборот.

Таким образом, при первом измерении получаем следующее количество информации:

$$J = -\sum_{i=1}^k q_i \log_2 \sum_{i=1}^k q_i - \left(1 - \sum_{i=k+1}^n q_i\right) \log_2 \left(1 - \sum_{i=k+1}^n q_i\right), \quad (8.20)$$

где k - номер элемента, за которым производится измерение реакции на контрольный сигнал.

Обозначим

$$P_k = \sum_{i=1}^k q_i, \quad (8.21)$$

тогда (8.20) примет вид

$$J = -P_k \log_2 P_k - (1 - P_k) \log_2 (1 - P_k) \quad (8.22)$$

Для сокращения времени поиска неисправности необходимо уменьшить число измерений, а это возможно при увеличении количества информации, получаемой от каждого измерения.

Определим условие, при котором получается наибольшее количество информации, для чего решим уравнение

$$dJ / dP_K = 0 \quad (8.23)$$

Решение уравнения (8.23) имеет вид

$$\log_2 P_K = \log_2(1 - P_K) \quad (8.24)$$

или

$$\sum_{i=1}^k q_i = \frac{\sum_{i=1}^k \lambda_i}{\sum_{i=1}^n \lambda_i} = 0,5 \quad (8.25)$$

Таким образом, установлено, что для достижения оптимальной процедуры поиска неисправности необходимо каждый раз производить измерение реакции на контрольный сигнал в точке схемы, которая делит предполагаемую неисправной схему по вероятности (интенсивности) пополам.

Алгоритм поиска неисправности в этом случае следующий:

- 1) исследуемая схема делится по условной вероятности отказа пополам и в точке деления производится испытание;
- 2) в зависимости от результата испытания принимается неисправной та или иная часть схемы;
- 3) для неисправной части схемы эта процедура повторяется;
- 4) повторение производится до тех пор, пока неисправным останется только один элемент.

Для аналитического представления процесса поиска неисправности, как правило, применяют его графическое изображение в виде программы поиска неисправностей. Условимся обозначать элемент в виде прямоугольника, а измерение в виде круга внутри с номерами элемента, за которым производится измерение. Тогда программа поиска неисправности будет представлять собой ветвящуюся схему, состоящую из кружочков с двумя выходами, обозначающих результат измерения (есть нужный сигнал или нет его) и оканчивающихся прямоугольниками, обозначающими неисправный элемент, см. рис. 8.2.

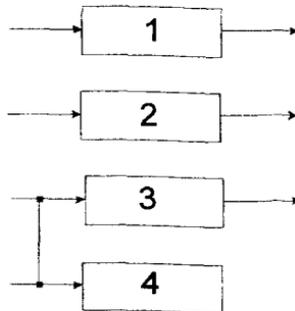


Рис. 8.1. Структурная схема изделия ИС

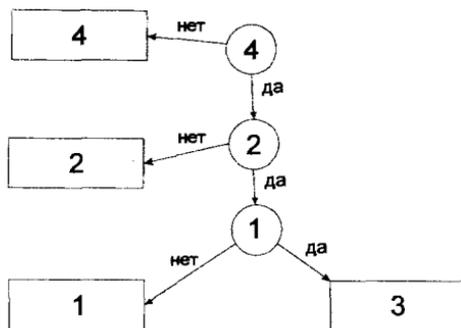


Рис. 8.2. Программа поиска неисправных изделий

8.5. Расчет ремонтнопригодности аппаратуры

Основным показателем ремонтнопригодности является среднее время восстановления аппаратуры после появления в ней неисправности.

Методы расчета безотказности были разработаны значительно раньше и в настоящее время почти полностью удовлетворяют требованиям инженерной практики. Этого нельзя сказать о методах расчета ремонтнопригодности, которые не нашли еще достаточного освещения и отечественной литературе.

Время текущего ремонта аппаратуры, с точки зрения его использования, разделяется, на активное время ремонта, административное время и время снабжения. Такое разделение времени ремонта целесообразно принять при расчете среднего времени восстановления аппаратуры. В настоящем параграфе будет рассмотрен расчет активного времени ремонта. Административное время ремонта имеет связь с активным временем [6, 8, 11] и может выражаться через него. Время снабжения будет подробно рассмотрено ниже.

При разработке методов расчета активного времени ремонта в первую очередь следует связать интенсивность отказов элементов с временем, необходимым на ремонт аппаратуры при отказе определенных элементов. По этому принципу и строится предварительная оценка ремонтнопригодности.

При простейшем потоке отказов элементов в случае неисправности аппаратуры условную вероятность отказа элементов i -й группы можно представить в виде

$$q_j^* = \frac{\lambda_j}{\sum_{j=1}^m \lambda_j}, \quad (8.26)$$

где λ_j – интенсивность отказов элементов j -й группы; m – количество групп элементов в аппаратуре.

Если обозначить активное время ремонта аппаратуры при отказе элемента j -й группы t_{aj} , то среднее активное время ремонта аппаратуры T_a определится как математическое ожидание;

$$T_a = \sum_{j=1}^m q_j t_{aj} \quad (8.27)$$

Для определения T_a по формуле (8.27) необходимо располагать данными о времени ремонта аппаратуры при отказе элементов различных групп. Время ремонта аппаратуры зависит от типа отказавшего элемента. Действительно, обнаружение и устранение отказа элемента (диода) требуют значительно меньшего времени, чем обнаружение и устранение отказа конденсатора. Кроме того, время t_{aj} весьма существенно зависит от типа аппаратуры и даже от расположения данного элемента в одном и том же типе аппаратуры

Несмотря на относительную неточность расчета ремонтпригодности, с помощью выражений (8.27) он является целесообразным, особенно для ориентировочной оценки на начальной стадии проектирования аппаратуры, когда еще не разработаны методы поиска и устранения неисправностей. В этом случае для расчета используют данные о средних значениях времени t_{aj} , полученные при эксплуатации или испытаниях аналогичной аппаратуры. Для осуществления такого расчета можно рекомендовать усредненные данные, приведенные в табл. 8.2.

Более точную величину среднего активного времени ремонта можно получить в том случае, когда разработаны методики и способы поиска неисправностей в аппаратуре.

Таблица 8.2

Время ремонта оборудования

Тип отказавшего элемента	Среднее время ремонта, ч	
	минимальное	максимальное
Полупроводниковые приборы	0,125	0,256
Резисторы	0,300	1,275
Конденсаторы	0,400	1,700
Реле	0,700	2,975
Переключатели	0,250	1,063
Электроизмерительные приборы	0,400	1,700
Индикаторы	0,030	0,128
Колебательные контуры	0,650	2,763
Прочие детали (панели, гнезда, клеммы и т. п.)	0,575	2,444

Для этого общее активное время ремонта целесообразно разделить на время поиска неисправного элемента и проверки аппаратуры и время замены элемента.

Среднее время поиска отказавшего элемента и проверки аппаратуры

$$t_{\text{опр}} = \sum_{i=1}^{n-1} q_j (\tau_{\text{пр}i} + \sum_{j=1}^i \tau_j), \quad (8.28)$$

где $\tau_{\text{пр}i}$ – среднее время проверки аппаратуры при отказе i -го элемента.

Среднее время $\tau_{\text{пр}i}$ неодинаково для различных элементов и зависит от места расположения отказавшего элемента.

Выражение (8.27) отличается от (8.28) только добавлением времени проверки исправности схемы после устранения неисправности. Следовательно, расчет среднего времени отыскания неисправности должен производиться в соответствии с оптимальной программой (последовательностью) поиска неисправного элемента и теми способами установления исправности элемента или схемы, которые в этом случае предусматриваются.

Алгоритм расчета $t_{\text{опр}}$ может быть следующим;

- а) аппаратура разбивается на элементы;
- б) выделяются части схемы, в которых будут применяться те или иные оптимальные методики поиска неисправностей и проверки аппаратуры;
- в) определяется оптимальная последовательность поиска неисправности каждого элемента;
- г) определяется оптимальное среднее время поиска неисправности при отказе каждого элемента \bar{t}_i в соответствии с оптимальной последовательностью и способом установления неисправности:

$$\bar{t}_i = \sum_{j=1}^i \tau_j, \quad (8.29)$$

где $j=1, 2, \dots, i$ – оптимальная последовательность проверки исправности элементов или части схемы; \bar{t}_i – соответствующее каждому шагу среднее время проверки;

- д) определяются условные вероятности отказов элементов по формуле (8.26);
- е) производятся арифметические операции по формуле (8.28).

Время замены неисправного элемента точнее можно определить, исходя из времен, необходимых при этом на производство определенного вида операций.

В основу разделения работы по замене элемента на операции должны быть положены следующие условия:

- 1) среднее время на выполнение элементарной операции не должно зависеть от вида аппаратуры;
- 2) среднее время на выполнение элементарной операции не должно зависеть от того, предшествовали ли ему какие-нибудь операции или нет;
- 3) частота повторения элементарных операций должна быть связана с какой-нибудь характеристикой аппаратуры;
- 4) все время, затрачиваемое на замену элемента, должно быть равно сумме времен, необходимых для осуществления отдельных операций.

К числу элементарных операций можно отнести следующие:

- а) снятие и установка блока, модуля;
- б) перепайка резистора, конденсатора, полупроводникового диода, интегральной схемы и т. п.;
- в) установка определенного типа потенциометра, трансформатора, переключателя, дросселя реле и т. п.;
- г) перепайка трансформатора, линии задержки, реле и т. п.;
- д) замена панели, гнезда и т. п.

Следует заметить, что при разбивке на большое количество операций увеличивается точность определения необходимого времени на операцию, но уменьшается точность определения частоты повторения этой операции. В связи с этим число операций следует ограничить, т. е. не производить слишком детального дифференцирования их. Например, перепайку резистора можно представить в виде следующих операций:

- а) отпайка одного конца;
- б) установка резистора;
- в) заправка одного конца резистора;
- г) припайка одного конца резистора и т. п.

Исследованиями [7, 15] установлено, что время выполнения операций для разных образцов аппаратуры имеет меньший разброс, чем время, необходимое на восстановление аппаратуры при отказе отдельных типов элементов.

Безусловно, что время, затрачиваемое на проведение части операций, зависит от конструкции аппаратуры и в некоторых случаях от навыков обслуживающего персонала. Зависимость от конструкции можно преодолеть путем дифференцирования одной операции на несколько, имеющие определенные конструктивные особенности аппаратуры.

Время проведения отдельных операций можно определить как в лабораторных условиях, так и в результате записи времени операций при реальном ремонте аппаратуры. Среднее время замены элемента $t_{3,cp}$ можно определить по формуле

$$t_{3,cp} = \sum_{s=1}^{i_j} P_s t_s, \quad (8.30)$$

где P_s – вероятность того, что при отказе аппаратуры необходимо будет при ее восстановлении производить s -ю операцию; i_s – среднее время, затрачиваемое на проведение s -й операции; i_j – число операций, которое может встретиться при замене элементов аппаратуры.

В свою очередь вероятность P_s может быть определена по условным вероятностям отказов комплектующих аппаратуру элементов:

$$P_s = \sum_{V=1}^{\omega} q_v, \quad (8.31)$$

где q_v – условная вероятность отказа элемента при отказе аппаратуры;
 $V = 1, 2, \dots, \omega \leq n$ – номера групп элементов, при отказе которых требуется проведение s -й операции.

Например, операцию перепайки двух концов необходимо производить при отказе резистора (R), конденсатора (C) и диода (D).

$$\text{Тогда } P_{\text{перепайки}} = q_R + q_C + q_D \quad (8.32)$$

С учетом выражений (8.28), (8.29), (8.30) и (8.31) среднее активное время ремонта аппаратуры при текущем ремонте

$$T_a = \sum_{i=1}^{n-i} \frac{\lambda_i}{\sum_{j=1}^n \lambda_j} (\tau_{\text{пр}i} + \sum_{j=1}^i \tau_j) + \sum_{s=1}^i t_s \sum_{V=1}^{\omega} \frac{\lambda_V}{\sum_{i=1}^n R_V} \quad (8.33)$$

Среднее административное время ремонта

$$T_{a0} = K_{a0} T_a, \quad (8.34)$$

где K_{a0} – коэффициент пропорциональности, который следует определять по статистическим данным ремонта аналогичной аппаратуры или в результате специального эксперимента.

Если обозначить среднее время снабжения (простоя) T_n , то среднее время восстановления аппаратуры

$$T_s = T_a (1 + K_{a0}) + T_n, \quad (8.35)$$

где T_a определяется по формуле (8.33). Из выражений (8.33) и (8.35) следует, что для более точной оценки ремонтоспригодности необходимо иметь дополнительные статистические данные, которые можно получить в лабораторных условиях в результате специального эксперимента.

8.6. Оценка ремонтоспригодности на основании статистических данных при эксплуатации ЭиВС

В технических требованиях на электронную аппаратуру предполагается возможность определения задаваемых характеристик как расчетным, так и опытным путем. Это в равной степени относится и к ремонтоспригодности. В результате проведения специального опыта или реальной эксплуатации аппаратуры получают значения времени ремонта аппаратуры при каждом ее отказе. На основании полученных из опыта статистических данных, ограниченных по объему, по соответствующим методам производят определение фактически возможного значения ремонтоспригодности с заданной точностью и достоверностью.

Методы обработки статистических данных (оценки ремонтоспригодности) зависят от распределения рассматриваемых величин.

Активное время текущего ремонта электронной аппаратуры чаще всего распределяется по экспоненциальному и логарифмически нормальному законам.

Экспоненциальное распределение

Статистическое среднее значение времени восстановления

$$T_B = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_{ai}, \quad (8.36)$$

где t_{ai} - время активного ремонта аппаратуры при i -и отказе; n количество отказов аппаратуры за опытный отрезок времени. Оценку точности производят по формулам:

$$T_a^* = T_a r_1 \quad (8.37)$$

$$T_a^n = T_a^* r_2 \quad (8.38)$$

Здесь T_a^* , T_a^n - соответственно верхние и нижние значения среднего времени восстановления при определенной достоверности;

$$r_1 = \frac{k}{\chi_{1-\alpha_d}} \quad (8.39)$$

$$r_2 = \frac{k}{\chi_{\alpha_d}}, \quad (8.40)$$

где k - число степеней свободы распределения вероятностей χ^2 ;

$$k = n - 1 \quad (8.41)$$

$\chi_{1-\alpha_d}, \chi_{\alpha_d}$ - квантили χ^2 распределения с k степенями свободы при вероятностях $1 - \alpha$ и α соответственно, α_d - вероятность достоверности выражений (8.37) и (8.38).

Значения r_1 и r_2 затабулированы в [3, 5].

Так как экспоненциальное распределение является однопараметрическим, то достаточно определить только T_a .

Логарифмически нормальное распределение

В результате опыта получают данные по времени ремонта аппаратуры при каждом ее отказе в виде ряда значений $t_{B1}, t_{B2}, \dots, t_{Bn}$

Для обработки результатов опыта при логарифмически нормальном распределении необходимо перейти к десятичному логарифму значений t_{B_i} .

Обозначив $\lg t_{ai} = x_i$, получаем ряд значений x_1, x_2, \dots, x_n , которые имеют нормальное распределение со статистическим средним

$$x^* = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (8.42)$$

и статистическим средним квадратическим отклонением

$$\delta_x^* = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - x^*)^2} \quad (8.43)$$

Для нормального распределения справедливы приближенные равенства

$$x^* \approx x_0 \approx M[x] \quad (8.44)$$

$$\sigma_x \approx \sigma_x^*, \quad (8.45)$$

где x_0 – математическое ожидание величин x .

Статистическое среднее значение для величин t_{Bi} определяется по формуле

$$\lg t_{Bi} = x^* + 1,15 \sigma_x^2 \quad (8.46)$$

Оценку точности выражения (8.46) производят по формулам [3, 5] при достоверности $2\alpha_0 - l$:

$$\lg T_B^B = x^* + 1,15 \sigma_x^* + U_{\alpha_d} \frac{\sigma_x^*}{\sqrt{n}} \sqrt{1 + 2,66 \alpha_x^{*2}} \quad (8.47)$$

$$\lg T_B^H = x^* + 1,15 \sigma_x^* - U_{1-\alpha_d} \frac{\sigma_x^*}{\sqrt{n}} \sqrt{1 + 2,66 \alpha_x^{*2}} \quad (8.48)$$

Следует заметить, что среднее значение величин t_{Bi} при логарифмически нормальном распределении не равно среднему времени восстановления, которое определяется как математическое ожидание из выражения (8.46). В результате неучета этого обстоятельства часто получают ошибочные оценки.

Таким образом, для правильной оценки ремонтпригодности необходимо предварительно знать закон распределения времени ремонта аппаратуры, который можно определить по известным методам оценки распределения [5, 8] или по предыдущим оценкам аналогичной аппаратуры.

Получение опытных данных при реальной эксплуатации аппаратуры связано с большой продолжительностью и, следовательно, с задержкой информации по ремонтпригодности аппаратуры.

Для сокращения времени получения этой информации можно промоделировать процесс появления отказов в аппаратуре, т. е. провести ускоренное испытание аппаратуры на ремонтпригодность.

При организации испытаний на ремонтпригодность, как и при всяких испытаниях, необходимо определить следующее:

- а) условия испытаний;
- б) количество и квалификацию обслуживающего персонала, участвующего в испытаниях;

- в) объем и последовательность испытаний;
- г) фиксируемые величины и способ их получения;
- д) метод обработки результатов испытаний,

Условия испытаний на ремонтпригодность должны быть, как можно больше приближены к реальным. С этой целью необходимо обратить внимание на приближение к следующим факторам: размещение аппаратуры; освещение и температурные условия; инструменты и испытательное оборудование; документация и др.

Количество обслуживающего персонала, одновременно участвующих в отыскании и устранении неисправности аппаратуры, должно соответствовать предписанному для ее эксплуатации, а квалификация их должна соответствовать средней, т. е. они должны иметь некоторые навыки в работе на испытываемой аппаратуре.

Объем испытаний определяется необходимой достоверностью оценки ремонтпригодности. Обычно считают, что достаточно иметь статистические данные по 50 отказам.

Последовательность испытаний на ремонтпригодность заключается в моделировании последовательности отказов элементов.

Для этого в первую очередь определяют количество отказов элементов разного типа по формуле.

$$m_i = S_n \frac{n_i \lambda_i}{\sum_{i=1}^k n_i k}, \quad (8.49)$$

где m_i - планируемое количество отказов элементов i -го типа; S_n - планируемое общее количество отказов аппаратуры; n_i - количество элементов i -го типа в аппаратуре; λ_i - интенсивность отказов элементов i -го типа; k - количество групп элементов в аппаратуре.

Затем с помощью таблицы случайных чисел [5, 8] определяют последовательность ввода неисправностей. Для возможности использования таблицы случайных чисел всем S_n планируемым отказам аппаратуры присваивают номера от 1 до S_n . Количество номеров, отводимых для элементов i -го типа должно соответствовать m_i . Далее присваивают номера блокам или модулям аппаратуры, которые имеют самостоятельную нумерацию комплектующих их элементов. В зависимости от количества планируемых отказов, числа блоков и количества комплектующих элементов одного типа в блоках выделяют определенное число десятичных разрядов для каждой из зон (тип отказа, блок в котором отказал элемент, номер отказавшего элемента). Обычно в таблицах случайных чисел числа разбиты по пять разрядов. Если пяти разрядов недостаточно, то объединяют числа с рядом стоящей колонкой. Допустим, что $S_n = 50$, количество блоков 9, количество элементов i -го типа 98. Возьмем в таблице случайных чисел несколько чисел подряд: 53 324, 43 166, 26 275, 05 926, 66 289. Первые два числа определяют номер отказа. Так как приняли $S_n = 50$, то первое и пятое числа являются неподходящими, их вычеркивают. Из оставшихся чисел вытекает такая последовательность ввода отказов: вводятся отказы с номерами 43, 26, 05 в блоки с номерами 1, 2, 9 для элементов соответствующего типа с номерами 66, 75, 26 соответственно.

В результате испытаний необходимо получить времена отыскания и устранения отказов. Наиболее исчерпывающую информацию можно получить, если производить *фиксацию времени* выполнения определенных операций.

Обработка результатов испытаний производится в соответствии с приведенными ранее методами.

Следует заметить, что прежде чем вводить в аппаратуру отказы, необходимо сначала их апробировать, чтобы определить их результат и выявить наличие определенных признаков. Перед каждым вводом неисправности необходимо убедиться в исправности аппаратуры.

8.7. Стоимость обслуживания ЭиВС

Значение учета стоимости обслуживания аппаратуры постоянно растет в связи с возрастающим оснащением промышленности разнообразной электронной аппаратурой.

Основными факторами, определяющими стоимость обслуживания аппаратуры, являются сложность аппаратуры, жесткость требований к ее параметрам и опытности обслуживающего персонала.

Сложность аппаратуры увеличивает стоимость обслуживания в связи с большим объемом профилактических мероприятий, необходимых для поддержания ее работоспособного состояния, и большим количеством отказов, требующих времени и средств для их ликвидации.

Жесткость требований к параметрам аппаратуры увеличивает время на профилактические мероприятия, так как требуется более тщательная настройка и регулировка, а также усложняет контрольную аппаратуру, требующую для проверки параметров основной аппаратуры, что приводит к росту стоимости обслуживания.

Повышение опыта обслуживающего персонала, как уже не раз отмечалось, уменьшает стоимость обслуживания аппаратуры, так как более опытный обслуживающий персонал быстрее отыскивает неисправности, быстрее и качественнее проводит профилактические мероприятия и расходует меньшее количество элементов для восстановления аппаратуры.

Качественно зависимость стоимости обслуживания аппаратуры от перечисленных факторов можно представить графиком рис. 8.3.

Общая стоимость аппаратуры

$$C = C_0 + C_2, \quad (8.50)$$

где C_0 – первоначальная стоимость аппаратуры, которая включает стоимость серийного производства и затраты на проектирование и обработку опытного образца; C_2 – стоимость эксплуатации аппаратуры.

В свою очередь стоимость эксплуатации аппаратуры состоит из

$$C_2 = C_{12} + \bar{C}_{\text{амп}} n = C_{12} + C_{22}, \quad (8.51)$$

где C_{13} - стоимость эксплуатации аппаратуры, не зависящая от числа отказов аппаратуры; $C_{отк}$ - средняя стоимость устранения одного отказа; n - количество отказов аппаратуры за рассматриваемый промежуток времени.

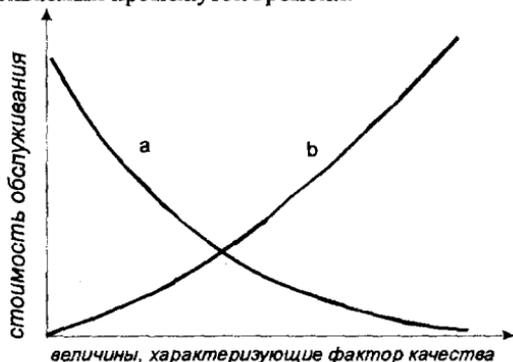


Рис. 8.3. Качественная зависимость стоимости обслуживания аппаратуры от влияющих на нее факторов:

а — от опытности обслуживающего персонала; б — от сложности и жесткости требований к параметрам аппаратуры

Составляющая эксплуатационных расходов C_{13} состоит из расходов на зарплату обслуживающего персонала, необходимого для работы на аппаратуре без учета их трудозатрат на устранение отказов, и стоимости используемых материалов, не связанных с необходимостью проведения ремонта (бензин, масло, краски, спирт, азот и др.).

Составляющая эксплуатационных расходов C_{23} зависит от трудозатрат, расходов на устранение отказа, необходимой квалификации обслуживающего персонала, стоимости испытательного оборудования, используемого при отыскании неисправностей, стоимости запасных элементов и надежности аппаратуры (числа ее отказов), ущерба, приносимого простоем аппаратуры.

Таким образом, стоимость аппаратуры, как и стоимость ее эксплуатации, зависит от безотказности и ремонтпригодности аппаратуры.

Наиболее полной характеристикой, учитывающей безотказность и ремонтпригодность аппаратуры, является коэффициент готовности, установившееся значение которого определяется формулой

$$K_r = T / (T + T_d) \quad (8.52)$$

Из формулы (8.52) очевидно, что для увеличения K_r необходимо увеличивать T и сокращать T_d , методы изменения которых рассматривались ранее.

Увеличение коэффициента готовности сокращает стоимость эксплуатации аппаратуры в результате уменьшения потребного количества аппаратуры для выполнения определенного задания и уменьшения трудозатрат на текущий ремонт.

Пусть для выполнения определенного задания с заданной вероятностью требуется m электронных изделий.

Ввиду возможного отказа изделия для обеспечения участия в выполнении задания в среднем m_1 изделий требуется иметь N_1 изделий:

$$m_1 = N_1 K_{r1}, \quad (8.53)$$

где K_{r1} – исходное значение коэффициента готовности.

При увеличении K_{r1} до K_{r2} потребуется меньшее количество изделий:

$$m_1 = N_2 K_{r2} \quad (8.54)$$

Из уравнений (8.53) и (8.54) путем простых преобразований получаем

$$\Delta N = N_1 - N_2 = \frac{K_{r2} + K_{r1}}{K_{r2}} N_1 \frac{\Delta K_r}{K_{r2}}, \quad (8.55)$$

где ΔK – сокращение количества требуемых изделий за счет увеличения K_{r1} на ΔK .

Проведение мероприятий по повышению коэффициента готовности аппаратуры связано с увеличением стоимости ее или за счет роста стоимости производства (проведение мероприятий по увеличению T и предусмотрение специальных мер и устройств для уменьшения T_d) или за счет роста стоимости эксплуатации (увеличение T за счет более тщательной профилактики и сокращение T_d путем использования более квалифицированного обслуживающего персонала). Качественно кривая зависимости возможного значения K_r от стоимости C представлена на рис. 8.4.

Из кривой рис. 8.4 можно получить семейство зависимостей $\frac{\Delta K_r}{K_{r2}}$ от стоимости увеличения $C = f(K_r)$, (рис. 8.5).

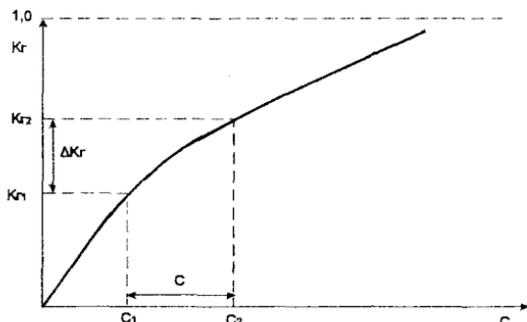


Рис. 8.4. Качественная зависимость K_r стоимости аппаратуры C

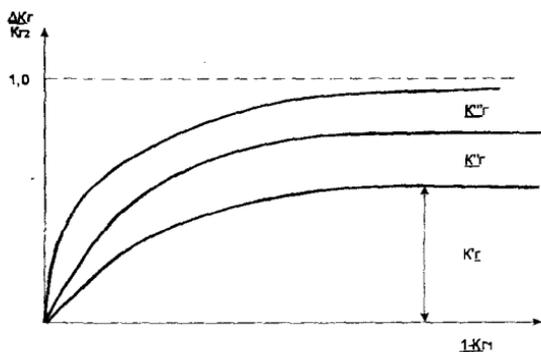


Рис. 8.5. Качественная зависимость $\frac{\Delta K_r}{K_{r2}}$ от стоимости увеличения $K_r(C)$

Если функцию $K_r = f(C)$ аппроксимировать зависимостью

$$K_r = 1 - e^{-\alpha_c C}, \quad (8.56)$$

где α_c - коэффициент аппроксимации

$$\frac{\Delta K_r}{K_{r2}} = \frac{1 - e^{-\alpha_c(C_2 - C_1)}}{e^{\alpha_c C_1} - e^{-\alpha_c(C_2 - C_1)}} = \frac{1 - e^{-\alpha_c C}}{e^{\alpha_c C_1} - e^{-\alpha_c C}}, \quad (8.57)$$

где C_{a1} - стоимость аппаратуры при коэффициенте готовности K_r .

Из (8.57) следует, что при устремлении $C \rightarrow \infty \frac{\Delta K_r}{K_{r2}} \rightarrow e^{-\alpha_c C_1}$, т. е. к постоянному значению $(1 - K_{r1})$.

Увеличение коэффициента готовности приводит, с одной стороны, к относительному снижению стоимости аппаратуры

$$C_a = C_{a1} \frac{\Delta N}{N_1} C_{a1} \frac{\Delta K_{r1}}{K_{r2}}, \quad (8.58)$$

где C_{a1} - стоимость одного экземпляра аппаратуры, с другой стороны, к снижению стоимости ущерба из-за простоя аппаратуры

$$C_y = \bar{C}_y (n_1 T_{B1} - n_2 T_{B2}), \quad (8.59)$$

где \bar{C}_y - среднее значение стоимости ущерба, приходящейся на единицу времени вынужденного простоя, и снижению стоимости текущего ремонта

$$C_{mp} = \bar{C}_{omx} (n_1 - n_2) \quad (8.60)$$

при

$$n_1 = \frac{i}{T_1} = \Delta_1 t; \quad n_2 = \frac{i}{T_2} = \Delta_2 t, \quad (8.61)$$

где $\bar{C}_{пр}$ - средняя стоимость устранения одного отказа; t - рассматриваемый отрезок времени (чаще всего год); Δ_1, Δ_2 - первоначальная и уменьшенная интенсивности отказов аппаратуры.

Общая экономия средств на одно изделие за счет повышения K_r

$$C = C_a + C_y = \frac{\Delta K_r}{K_{r2}} C_{a1} + \bar{C}_y t (\Delta_1 T_{B1} - \Delta_{B2}) + \bar{C}_{отк} t (\Delta_1 - \Delta_2) \quad (8.62)$$

Если расходы по повышению коэффициента готовности меньше или равны экономии средств в результате его повышения, то повышение K_r является целесообразным и желательным.

Стоимость затрат на обслуживающий персонал включает зарплату, питание, обмундирование, административные расходы и т. п.

Стоимость материалов дополнительно включает стоимость транспортировки и административные расходы без учета расходов на хранение. Обычно следует, что стоимость обслуживания существенно больше стоимости расходуемых материалов и коэффициент стоимости больший у менее сложного оборудования.

Из этого можно сделать вывод, что наиболее важным направлением уменьшения стоимости эксплуатации является сокращение количества персонала, обслуживающего аппаратуру.

ГЛАВА 9. Техническое обслуживание электронной аппаратуры

9.1. Техническое обслуживание и его организация

Техническое обслуживание ЭиВС, включает следующие мероприятия:

- 1) контроль технического состояния;
- 2) профилактическое обслуживание;
- 3) снабжение;
- 4) сбор и обработка результатов эксплуатации.

Основным содержанием технического обслуживания является профилактическое обслуживание, т.е. такое техническое обслуживание, которое выполняется, как правило, в плановом порядке с целью поддержания аппаратуры в исправном состоянии, предупреждения отказов при использовании по назначению и продления ее ресурса.

Рассмотрим содержание основных профилактических мероприятий: внешний осмотр и чистка аппаратуры; контрольно-регулирующие работы; прогнозирование отказов; технические осмотры; технические проверки.

Внешний осмотр и чистка аппаратуры

Внешний осмотр выполняют с целью выявления внешних признаков возможных неисправностей, проверки правильности установок органов управления аппаратурой, показаний встроенных приборов и сигнализации, проверки состояния элементов и монтажа.

Для поддержания аппаратуры в чистом состоянии необходимо регулярно удалять с нее пыль, влагу и появляющуюся коррозию. Работы по чистке аппаратуры следует проводить осторожно и тщательно с помощью пылесоса, набора сухих щеток и кистей, фланели, ветоши, спирта и красок.

Наиболее трудоемкой частью профилактического обслуживания электронной аппаратуры являются контрольно-регулирующие работы и тесно связанные с ними работы по прогнозированию отказов, т. е. аппаратурный контроль параметров элементов и систем и их изменение с помощью предусмотренных органов регулировок без изменения схемы и конструкции.

Контрольно-регулирующие работы

Контрольные работы включают в себя контроль параметров аппаратуры, т. е. определение численных значений параметров или их состояний относительно установленных допусков на контролируемые параметры.

Регулирующие работы проводят с целью восстановления утраченных аппаратурой (элементом) свойств или работоспособности, а также получения оптимальных технических характеристик. Регулирующие работы, проводимые без изменения схемы и конструкции, называют настройкой аппаратуры.

Прогнозирование отказов

Прогнозирование отказов есть метод предсказания отказов, который основывается на предположении, что возникновению отказа предшествует постепенное изме-

нение параметров объекта или элементов. Поэтому прогнозирование возможно преимущественно при постепенных отказах.

Прогнозирование отказов представляет собой процесс получения информации о состоянии объекта или элемента в настоящий момент времени по результатам измерения их параметров и специальных испытаний, обработке этой информации и на основании этого определение времени перехода объекта (элемента) в неисправное состояние (выход основного параметра за пределы допуска).

Основная цель прогнозирования отказов состоит в том, чтобы обнаружить в объекте элементы, постепенные изменения параметров которые могут привести к отказу аппаратуры при работе, и своевременно заменить (отремонтировать, отрегулировать) их.

Сезонные, смазочные и технические осмотры.

Одним из важнейших условий поддержания электронной аппаратуры в исправном состоянии является повседневный и систематический контроль ее технического состояния, для чего проводят технические осмотры и технические проверки аппаратуры.

Технические осмотры

Технические осмотры *осуществляют* с целью проверки правильности содержания и сбережения аппаратуры, проверки работоспособности и технического состояния, правильности ведения технической и учетно-отчетной документации и укомплектованности ЗИПом и расходным материалом.

Технические проверки

Технические проверки осуществляют с целью определения технического состояния, работоспособности и готовности аппаратуры. Техническая проверка включает в себя: технический осмотр, проверку организации эксплуатации, работоспособности аппаратуры, своевременности проведения регламентных работ, ремонта и знания обслуживающим персоналом аппаратуры и правил ее эксплуатации.

Профилактические мероприятия для многих типов аппаратуры можно сгруппировать по трем характерным этапам.

1. Профилактические работы на обесточенной аппаратуре, как правило, выполняют при внешнем осмотре и чистке аппаратуры; при смазочных, крепежных и сезонных работах. При этом проводят следующие виды работ:

- а) разборка аппаратуры, осмотр состояния креплений, паек и монтажа;
- б) чистка элементов и блоков аппаратуры, замена смазок и влаго-поглотителей;
- в) проверка качества изоляции монтажа, кабелей и утечки электролитических конденсаторов;
- г) проверка точности срабатывания реле с помощью простейшей контрольно-измерительной аппаратуры.

2. Профилактические испытания узлов и блоков аппаратуры под током включают работы:

- а) установка режимов работы аппаратуры;
- б) проверка работоспособности элементов и устройств аппаратуры в нормальных и специальных режимах;
- в) регулировка и подстройка параметров отдельных элементов и устройств.

3. Профилактический контроль функционирования аппаратуры состоит из следующих работ:

- а) сборка и комплектация аппаратуры;
- б) контроль работоспособности аппаратуры в нормальных и специальных режимах;
- в) комплексная отладка и проверка основных параметров аппаратуры в целом.

При выполнении профилактических работ на каждом этапе обслуживания осуществляют операции по поддержанию аппаратуры в исправном состоянии, по выявлению неисправных элементов и их замене или восстановлению (замена обгоревших резисторов, износившихся разъемов, кабелей и щеток электродвигателей, чистка контактов реле, подстройка отдельных элементов и параметров аппаратуры). Профилактические работы отличаются одна от другой уровнем обслуживания, т. е. объемом работ, предусмотренным для данного вида профилактического обслуживания. При определении объема и периодичности проведения профилактических мероприятий (регламентных работ) исходят из следующих противоречивых требований: с одной стороны, необходимо повышать эксплуатационную надежность аппаратуры за счет проведения профилактических работ, что требует значительных затрат времени, сил и средств, с другой стороны, длительный простой дорогостоящей аппаратуры на профилактике ведет к экономическим потерям и снижению эффективности ее использования. Следовательно, определяют такие объем и периодичность регламентных работ, которые обеспечили бы достаточно высокую надежность аппаратуры (минимальное время простоя) и минимальную суммарную стоимость экономических затрат. При организации профилактических мероприятий к ним предъявляют требования:

- а) система профилактических мероприятий должна обеспечивать поддержание параметров надежности аппаратуры на требуемом уровне;
- б) стоимость профилактических работ и время их выполнения должны быть минимальными;
- в) организация и планирование профилактических мероприятий должны быть по возможности простыми.

Научно обоснованная организация системы профилактического обслуживания позволяет не только поддерживать уровень надежности электронной аппаратуры, предусмотренный, при проектировании и полученный при производстве, но и дает возможность повысить его за счет предотвращения некоторой части отказов путем своевременного выявления и устранения неисправностей. При этом обязательно учитывают опыт эксплуатации данной аппаратуры в реальных условиях опыт эксплуатации аналогичной аппаратуры.

Объем и периодичность выполнения регламентных работ регламентируются (узакониваются) специальными инструкциями по эксплуатации конкретной аппаратуры. Периодичность регламентных работ назначают исходя из времени работы аппаратуры или календарного срока службы [3, 15].

При календарном принципе регламентные (профилактические) работы проводят через определенный календарный срок независимо от того, сколько времени использовалась по назначению аппаратура в течение этого срока. Календарные регла-

ментные работы приняты в качестве основных для электронной аппаратуры; они могут быть ежедневными, еженедельными (декадными), месячными, квартальными, полугодовыми и годовыми. Каждый последующий вид из перечисленных регламентных работ имеет соответственно больший объем работ, чем предыдущий, и, как правило, включает весь объем работ предыдущего вида.

При временном принципе, периодичность выполнения регламентных работ определяют исходя из времени наработки аппаратуры, влиянием процессов старения на надежность аппаратуры при этом пренебрегают. Календарный принцип предпочтительнее потому, что позволяет заранее планировать регламентные работы, согласуя их с проведением других мероприятий.

Для сложной аппаратуры иногда используют смешанный (комбинированный) принцип (временный и календарный) назначения периодичности выполнения регламентных (профилактических) работ.

После того как система профилактики выбрана, определяют оптимальные (или рациональные) характеристики профилактического, обслуживания (периодичность и длительность проведения профилактических работ) и составляют план-график проведения основных работ. При оптимизации указанных характеристик исходят из требований по поддержанию заданных уровней надежности аппаратуры, ее готовности к работе, экономических и трудовых затрат.

При организации и проведении профилактических мероприятий необходимо учитывать способ использования аппаратуры. По способу использования электронную аппаратуру можно разделить на три группы [8]: непрерывно работающая аппаратура, аппаратура разового действия и дежурная аппаратура.

Непрерывно работающая аппаратура используется по своему целевому назначению в течение суток (или в определенную часть суток), если в ней нет отказов. К такой аппаратуре относятся электронно-вычислительные машины и т.д. Периодическое проведение профилактических и ремонтных работ должно занимать незначительную часть времени, чтобы не снижать коэффициент использования непрерывно работающей аппаратуры.

Аппаратура разового действия используется по своему целевому назначению только один раз. Например, бортовая аппаратура, устанавливаемая на объектах разового использования, разрушается вместе с объектом.

Для аппаратуры разового действия характерны различные режимы ее работы, основными из которых являются:

- 1) хранение;
- 2) подготовка к использованию по назначению, т. е. работа под током с целью контроля работоспособности аппаратуры или подготовки к непосредственному использованию;
- 3) использование по назначению, т. е. работа под током в условиях применения аппаратуры по целевому назначению.

До использования по назначению аппаратура разового действия значительное время находится на хранении. При этом для поддержания аппаратуры в исправном состоянии и при подготовке к использованию проводят все виды профилактическо-

го обслуживания. Если при выполнении профилактических работ в аппаратуре обнаруживается неисправность, то ее восстанавливают ремонтом или заменой,

При работе в третьем режиме отказы аппаратуры недопустимы, так как в этом случае она не сможет выполнить своей задачи, а восстановление аппаратуры при этом невозможно.

Дежурная аппаратура является аппаратурой многоразового или разового действия. Например, контрольно-измерительная аппаратура, связанная радиоаппаратура и т.п. Дежурная аппаратура используется по своему целевому назначению часть времени суток. Время подачи заявки на использование такой аппаратуры является случайным. При подаче заявки аппаратура начинает работать под током в номинальном режиме, в остальное время аппаратура работает в облегченном режиме (в обесточенном состоянии или под током работают не все элементы системы). При отсутствии заявки могут проводиться профилактические работы (обычно в специально отведенное время).

9.2. Периодичность и объем профилактических работ на непрерывно работающей аппаратуре

При эксплуатации непрерывно работающей аппаратуры различают два вида отказов - *внезапные* (полные) и *постепенные* (частичные).

Появление внезапных (полных) отказов представляет собой простейший поток случайных событий и характеризуется постоянной интенсивностью отказов $\lambda_{вн} = const$. Поэтому внезапные отказы прогнозировать и профилактировать не представляется возможным, их устраняют немедленно по мере возникновения.

Постепенные (частичные) отказы появляются в результате постепенного изменения параметров аппаратуры и элементов, что позволяет своевременно предотвращать их профилактическими мероприятиями (регламентные работы). Будем считать, что получение информации о состоянии параметров аппаратуры (о появлении постепенных отказов) осуществляется при выполнении контрольно-регулирующих работ (регламентных работ), которые проводят периодически. При этом возникает задача о выборе величины периода выполнения регламентных работ. При сокращении межрегламентного периода повышается надежность аппаратуры за счет своевременного проведения контрольно-регулирующих работ. Однако при этом одновременно увеличивается объем профилактики [5, 8]. Очевидно, имеется определенное оптимальное значение величины периода выполнения регламентных работ, при котором обеспечивается лучшее соотношение между надежностью аппаратуры и объемом профилактики. В качестве основного критерия для оценки эксплуатационных свойств ЭИВС непрерывного действия целесообразно принять коэффициент использования аппаратуры K_u (7.58) или коэффициент простоя K_n .

Рассмотрим методику определения оптимального периода проведения регламентных работ, при котором коэффициент использования системы будет наибольшим. Для решения поставленной задачи примем допущения:

а) отказами аппаратуры контроля можно пренебречь;

б) аппаратура контроля обеспечивает абсолютную достоверность проверки.

Среднее суммарное время вынужденного простоя аппаратуры непрерывного действия за время работы

$$t_{n\Sigma} = T_{cp}(t) + t_{B\Sigma} + t_{окс\Sigma} \quad (9.1)$$

$$T_{cp}(t) = \frac{i}{T_p} \sum_{i=1}^{n_{om}} t_{np i} N_{np}(t) T_{np} \quad (9.2)$$

T_{cp} - объем профилактики т, е. среднее время, затраченное на выполнение регламентных работ за время работы t , t_{np} - среднее время выполнения i -й операции; n_{om} - число операций при выполнении одной профилактики; T_{np} - среднее время выполнения одной профилактики; T_p - период выполнения регламентных работ; $N_{np}(t)$ - целое число профилактик за время работы t ;

$$t_{a\Sigma} = \sum_{i=1}^n t_{ai} = nT_a \quad (9.3)$$

$t_{a\Sigma}$ - среднее суммарное время восстановления аппаратуры в течение t ; t_{Bi} - время устранения i -й неисправности (восстановления); n - число неисправностей в ЭИВС за время работы t ; T_a - среднее время устранения одной неисправности (время восстановления); $t_{окс\Sigma}$ - среднее суммарное время нахождения аппаратуры в неисправном состоянии в течение t .

Время $t_{окс\Sigma}$ обусловлено тем, что некоторые неисправности выявляются только при профилактике. Это справедливо для постепенных отказов, которые обнаруживаются обычно при выполнении профилактики с помощью контрольной аппаратуры, а для полных отказов $t_{окс} = 0$, так как они устраняются сразу же после возникновения

9.3. Периодичность и объем профилактических работ на дежурной аппаратуре

Периодичность профилактических работ

При определении периода выполнения регламентных работ на дежурной аппаратуре необходимо учитывать ее назначение и специфику использования. Профилактические мероприятия обычно проводятся в специально отведенное время, когда отсутствует заявка на использование аппаратуры по целевому назначению. Для обоснования рационального (или оптимального) периода выполнения регламентных работ можно воспользоваться выражением:

$$T_{FO} = \sqrt{\frac{2T_{np}}{\lambda_{по}}} = \sqrt{2T_{np} \cdot T_{по}}, \quad (9.4)$$

где T_{np} - среднее время выполнения одной профилактики;

$T_{по}$ – среднее время постепенных отказов;

$\lambda_{по}$ –интенсивность постепенных отказов.

Например, если дежурная аппаратура небольшую часть времени работает под током, а остальное время находится в обесточенном состоянии, что равноценно хранению с точки зрения интенсивности отказов ЭиВС, то при выборе периодичности регламентных работ следует воспользоваться (9.4). Если при этом в режиме ожидания заявки часть аппаратуры работает под током непрерывно, то для этой части аппаратуры целесообразно выбрать оптимальную периодичность в соответствии с выражением (9.4).

Если же дежурная аппаратура большую часть времени работает под током, а большую часть времени находится в обесточенном состоянии (хранится), то можно, пренебречь только влиянием на надежность процесса хранения и учитывать только время работы ЭиВС под током. Оптимальный период $T_{p,опт}$ при этом следует вычислять по формуле (9.4), причем $T_{p,опт}$ здесь будет определяться для временной наработки ЭиВС под током.

Объем профилактических работ

Объем профилактических работ на ЭиВС оценивается средним временем, которое затрачивается на их выполнение в течение календарного срока t , и определяется выражением:

$$T_{cp}(t) = \frac{i}{T_p} \sum_{i=1}^{i_{o,n}} t_{npi}, \quad (9.5)$$

где t_{npi} - среднее время выполнения i -й операции; $n_{o,n}$ - число операций при выполнении одной профилактики.

Если с помощью критерия $T_{cp}(t)$ оценивается объем регламентных работ, то $n_{o,n}$ будет равно числу контролируемых (и регулируемых) параметров,

Объем регламентных работ зависит от периода их проведения T_p числа и последовательности проверяемых и регулируемых параметров, $n_{o,n}$ и среднего времени выполнения каждой операции t_{npi} .

Поддержание надежности ЭиВС на заданном уровне, обеспечивается проведением регламентных работ с периодичностью, определяемой по формуле (9.4). Число контролируемых параметров, сведенное до минимума, должно позволять практически достоверно судить о ее техническом состоянии. Это даст возможность с большой вероятностью гарантировать исправное состояние аппаратуры после проведения регламентных и ремонтных (при обнаружении неисправностей) работ.

9.4. Методы прогнозирования отказов ЭиВС.

Основные понятия и классификация методов прогнозирования.

Прогнозирование отказов как уже отмечалось, является одним из способов повышения надежности ЭиВС в процессе ее эксплуатации.

Сущность прогнозирования отказов заключается в том, что на основании имеющейся информации о параметрах системы или элементов определяют вероятный

момент появления отказа и принимают меры по его предупреждению (замена элемента, восстановление элемента, регулировка).

Таким образом, основным содержанием прогнозирования отказов являются процесс получения информации о состоянии элемента или системы в настоящий момент времени, обработка этой информации и на основании этого определение вероятности появления отказа Q_{np} при работе ЭИВС в межрегламентный период - период прогнозирования.

Из изложенного следует, что прогнозировать можно преимущественно постепенные отказы параметра. При прогнозировании отказов можно значительно повысить эксплуатационную надежность ЭИВС. Повышение надежности ЭИВС при эксплуатации за счет прогнозирования отказов оценивают эффективностью профилактики.

$$W = \frac{T_{проф}}{T_0}, \quad (9.6)$$

где T_0 – наработка на отказ непрофилактируемой аппаратуры;

$T_{проф}$ – наработка на отказ профилируемой аппаратуры.

Методы прогнозирования отказов элементов различают по типу используемого контролируемого параметра.

Контролируемым параметром называют такую, характеристику, контроль за которой позволяет определить техническое состояние аппаратуры, объекта, узла или элемента.

Контролируемые параметры делятся на определяющие и вспомогательные.

Определяющим параметром называют такой параметр, который определяет техническое состояние объекта (аппаратуры) в целом.

По определяющему параметру получаем наиболее полные сведения о качестве выполнения аппаратурой заданной функции. Например, чувствительность, точность, стабильность и т.п.

Вспомогательным параметром называют такой параметр, который определяет техническое состояние отдельного узла или элемента и позволяет определить место неисправности.

На каждый параметр можно установить уровень прогноза, т. е. такое значение параметра, при достижении которого вероятность появления отказа Q_{np} в течение периода прогнозирования $T_{проф}$ становится больше заданного значения $Q_{np,доп}$ т. е.,

$$Q_{np}(T_{проф}) > Q_{np,доп} \quad (9.7)$$

Вероятность безотказной работы системы или элемента в течение периода прогнозирования $T_{прог}$ (в межрегламентный период) называют достоверностью прогноза

$$P_{np} = 1 - Q_{np} \quad (9.8)$$

Прогнозирование отказов можно осуществлять на основе использования *статистических или аппаратурных (инструментальных) методов.*

ГЛАВА 10. Основные понятия эксплуатационного обслуживания ЭиВС

10.1. Основные эксплуатационные характеристики ЭВМ

Пользователя в первую очередь интересуют параметры ЭВМ и особенности ее архитектуры, определяющие вычислительные возможности машины. К ним относятся производительность (скорость работы) процессора (число выполняемых операций в секунду), емкость памяти (число байт), состав и параметры периферийных устройств, а также следующие архитектурные характеристики: способ организации системы обмена информацией между ядром ЭВМ и периферийными устройствами, пропускная способность этой системы (число байт в секунду), формы представления данных в ЭВМ, способы адресации, особенности системы команд, средства общения пользователя с машиной, характеристики ее операционной системы, реализуемые режимы работы (мультипрограммный, разделение времени, реальный масштаб времени) и др.

Важнейшими эксплуатационными характеристиками ЭВМ являются ее производительность Π и общий коэффициент эффективности машины

$$\Xi = \frac{\Pi}{C_{ЭВМ} + C_{ЭКС}}, \quad (10.1)$$

представляющий собой отношение ее производительности к сумме стоимости самой машины $C_{ЭВМ}$ и затрат на ее эксплуатацию за определенный период времени (например, период окупаемости капитальных затрат) $C_{ЭКС}$.

Так как часто бывает трудно оценить затраты на эксплуатацию данной модели ЭВМ, то оценивают эффективность ЭВМ по упрощенной формуле:

$$\Xi = \frac{\Pi}{C_{ЭВМ}} \quad (10.2)$$

Оценка и сопоставление производительности различных ЭВМ представляют собой сложную проблему, в сущности не получившую до сих пор удовлетворительного решения.

Интуитивно под производительностью ЭВМ понимают количество «вычислительной работы» или, другими словами, число задач, выполняемых машиной в единицу времени. Однако, на производительность ЭВМ, оцениваемую по числу решенных в единицу времени задач, влияет слишком много факторов, в том числе тип задач, число тех или иных операций, выполняемых при решении задач, логические возможности системы команд, структура, процессора, характеристики и организация оперативной и внешней памяти, особенности операционной системы, состав и характеристики периферийных устройств и др.

В настоящее время производительность ЭВМ общего назначения оценивается упрощенно по скорости выполнения некоторых комбинированных команд, формируемых путем анализа частоты исполнения разного вида команд при выполнении программ решения задач некоторого класса, например научно-технических или планово-экономических задач. На основе такого анализа отдельным видам команд присваиваются определенные весовые коэффициенты.

При использовании комбинированных команд производительность ЭВМ определяется по формуле

$$\Pi = \frac{\left(\sum_{s=1}^h k_s \right)}{\left(\sum_{s=1}^h k_s t_s \right)}, \quad (10.3)$$

где k_s и t_s - соответственно весовой коэффициент и продолжительность выполнений s -й команды; h - число различных команд в комбинации.

Использование комбинированных команд алгоритмических действий вместо комбинированных команд способствует сопоставимости расчетных значений производительности ЭВМ с различными системами команд.

Рассмотренные характеристики являются только номинальными показателями; они реализуются, если ЭВМ работоспособна. Суждение о реальных возможностях выполнения машиной определенных функций, решения данного комплекса задач, особенно задач управления, требующих обработки данных в реальном масштабе времени, может быть вынесено только с учетом характеристик эксплуатационной надежности машины.

Общие закономерности нарушений работоспособности, различных объектов, закономерности процессов обеспечения и поддержания работоспособного состояния объектов изучает теория надежности.

Согласно современным представлениям под *надежностью* понимается свойство изделия (элемента, узла, устройства, машины, системы) выполнять заданные функции, сохраняя во времени свои характеристики в установленных пределах при определенных режимах и условиях использования, технического обслуживания, режимах хранения и транспортирования.

При оценке и анализе надежности какого-либо объекта приходится иметь дело со случайными событиями и величинами, что заставляет использовать понятия и методы теории вероятностей.

Надежность вычислительной машины определяется безотказностью, достоверностью функционирования и характеристиками обслуживаемости, в первую очередь ремонтпригодностью (восстанавливаемостью после отказов), восстанавливаемостью информации после сбоев и проверкопригодностью.

Безотказность ЭВМ - свойство машины сохранять работоспособность в течение определенного промежутка времени при условии удовлетворения заданных ограничений на условия эксплуатации. Безотказность ЭВМ характеризуется закономерностями возникновения отказов. Под отказом понимается событие, заключающееся в полной утрате машиной, работоспособности из-за возникшей неисправности и при-

водящее к невыполнению или ошибочному выполнению тестов, задач под управлением операционной системы или задач пользователя.

Отказ ЭВМ - это такое нарушение ее работоспособности, для устранения которого требуются определенные действия обслуживающего персонала по ремонту, замене и регулировке неисправного элемента, узла или устройства.

Отказы делятся на внезапные и постепенные.

Внезапный отказ - это практически мгновенное изменение какого-либо параметра (например, возрастание сопротивления цепи, вследствие обрыва или электрического пробоя и т.п.).

Постепенный отказ - это происходящее во времени накопление количественных изменений некоторого параметра, достигнувшего значения, при котором машина оказывается в неработоспособном состоянии.

Интервалы между отказами являются случайными величинами с некоторым законом распределения.

Безотказность ЭВМ может быть оценена *средним временем наработки машины на один отказ* (\bar{T}_o).

Последствия отказов характеризуются случайными величинами продолжительности перерыва в функционировании машины из-за ремонтных работ (случайными величинами продолжительности ремонта).

Ремонтпригодность ЭВМ - это степень приспособленности к предупреждению, обнаружению и устранению отказов. Ремонтпригодность определяет потерю работоспособности машины вследствие необходимости производить устранение неисправностей. Количество времени, затрачиваемого на ремонт для устранения отказа, является случайной величиной. Ремонтпригодность ЭВМ можно оценить средним временем устранения неисправности, другими словами, *средним значением времени восстановления работоспособности после отказа* $\bar{T}_{в.о.}$

Работа ЭВМ заключается в выполнении преобразований информации.

В силу указанной специфики рабочего процесса надежность ЭВМ наряду с безотказностью определяется также *достоверностью функционирования*.

Достоверность функционирования ЭВМ - это свойство машины, определяющее безошибочность производимых машиной преобразований информации и характеризующееся закономерностями появления ошибок из-за сбоев.

Сбоек называют событие, состоящее во временной утрате работоспособности ЭВМ и характеризующееся возникновением ошибки при выполнении тестов, задач под управлением операционной системы или задач пользователя. Для восстановления работоспособности ЭВМ при сбое требуется проведение повторных действий по решению теста или задачи (их частей) или повторных их загрузках в ЭВМ для решения [5].

Сбой вызывается кратковременной самоустраняющейся неисправностью, нарушающей нормальное функционирование машины (кратковременное воздействие на некоторый элемент или элементы внешних помех, кратковременное изменение параметров элементов, например, кратковременные нарушения контактов и т.п.). После сбоя машина длительное время может работать нормально. Сбой сопровождается искажением информации при операциях передачи, хранения и обработки.

Следовательно, если не устранить последствия сбоя, то задача может оказаться неправильно решенной из-за искажений в данных, промежуточных результатах или в самой программе.

Однако если при отказе для восстановления работоспособности машины или системы необходимо устранить неисправность в аппаратуре, то при сбое достаточно восстановить только достоверность информации, что хотя и связано с потерями рабочего времени ЭВМ (например, на повторный пуск программы или ее части), но не требует ремонта или регулировки аппаратуры. В силу этого восстановление достоверности функционирования сравнительно легко может быть автоматизировано. Достоверность функционирования ЭВМ можно оценить *средним временем наработки машины на один сбой* \bar{T}_c .

Для оценки достоверности функционирования некоторых устройств удобно пользоваться средним количеством правильно переданной (считанной - записанной) информации (измеряемой в битах), приходящейся на одну ошибку.

Для более полной оценки достоверности функционирования введем в состав эксплуатационных характеристик ЭВМ восстанавливаемость вычислительного процесса, оцениваемую *средним временем восстановления вычислительного процесса после сбоя* ($\bar{T}_в$).

В процессе развития вычислительной техники повышение безотказности и достоверности функционирования ЭВМ достигалось путем использования более надежных элементов (переход к полупроводниковым и затем к интегральным микросхемам), применения облегченных нагрузочных режимов для схемных компонентов, совершенствования конструкций и технологии (печатный, в том числе многослойный, монтаж, плоские кабели, монтаж «накруткой»), поверхностный монтаж элементов на печатных платах, улучшение вентиляции блоков ЭВМ, согласование линий передачи сигналов, термоэлектротренировки элементов и др.), автоматизации проектирования, изготовления и контроля узлов и соответствующих решений в отношении структуры и организации вычислительного процесса ЭВМ.

Для современных ЭВМ среднее время наработки на отказ составляет от нескольких сотен часов для больших и средних ЭВМ общего назначения до нескольких тысяч часов для мини- и микроЭВМ. Среднее время восстановления после отказа составляет 0,5-1 ч, а среднее время восстановления вычислительного процесса после сбоя, если оно требует манипуляций со стороны обслуживающего персонала, - 0,2-0,3 ч.

В большинстве случаев ЭВМ представляют собой восстанавливаемые и обслуживаемые объекты. Восстановление заключается в устранении неисправностей (отказов) и последствий сбоев. Важной функцией обслуживания является проведение профилактических проверочных испытаний (профилактического контроля) для выявления элементов и узлов, параметры которых близки к предельно допустимым, и их замены или подрегулировки. Кроме того, профилактические испытания предназначены для выявления неисправностей в аппаратуре, не охваченной средствами автоматического контроля правильной работы.

Целью профилактических испытаний является увеличение наработки на отказ в период между профилактическими испытаниями. Поэтому эффективность профи-

лактических испытаний определяется отношением средних величин наработки на отказ при наличии профилактических испытаний ($\overline{T}_{с.пф}$) и без них (\overline{T}_c):

$$\mathcal{E}_{пф} = \frac{\overline{T}_{о.пф}}{\overline{T}_o} \quad (10.4)$$

Для оценки профилактических испытаний используют также коэффициент их результативности, равный отношению числа отказов, выявленных при профилактических испытаниях ($n_{пф}$), к общему числу отказов, обнаруженных по время профилактических испытаний и при работе машины в период между профилактиками ($n_{пф} + n_{рвб}$):

$$k_{пф} = \frac{n_{пф}}{n_{пф} + n_{рвб}} \quad (10.5)$$

Значения $\mathcal{E}_{пф}$ и $k_{пф}$ зависят от промежутка времени между профилактическими испытаниями и объема профилактических испытаний.

Профилактическое обслуживание сопряжено с потерями рабочего времени машины. Эти потери по своему характеру близки к потерям, связанным с устранением отказов.

Поэтому одной из важных эксплуатационных характеристик является *проверкопригодность ЭВМ*, которую можно оцепить *средней продолжительностью профилактических проверочных испытаний ($T_{пф}$)*.

Введенные выше понятия ремонтпригодности, восстанавливаемости информации и проверкопригодности в совокупности определяют важный комплексный эксплуатационный показатель - *обслуживаемость ЭВМ*, или степень приспособленности машины к процедурам ее эксплуатационного обслуживания.

Однако приведенные выше оценки этой приспособленности - величины $\overline{T}_{а.о}$, $\overline{T}_{с.с}$, $\overline{T}_{п.ф}$ - определяют приспособленность к обслуживанию только с точки зрения связанных с обслуживанием потерь рабочего времени машины. Для более полной оценки обслуживаемости ЭВМ необходимо учитывать затраты труда обслуживающего персонала и требования к его квалификации.

Очевидно, что чем выше надежность ЭВМ, тем больше может быть период между профилактическими работами, тем реже возникает потребность в восстановительных работах. Чем меньше тратится машинного времени и квалифицированного труда на профилактику и устранение возникших неисправностей, тем выше степень обслуживаемости ЭВМ.

Для более полной оценки свойств обслуживаемости ЭВМ можно воспользоваться *средними значениями затрат* на соответствующие операции обслуживания:

восстановление работоспособности после отказа

$$\overline{q}_{в.о} = \overline{T}_{в.о} \cdot \overline{C}_{в.о} \quad (10.6)$$

восстановление вычислительного процесса (достоверность информации) после сбоя

$$\bar{q}_{в.с} = \bar{T}_{в.с} \cdot \bar{C}_{в.с} \quad (10.7)$$

профилактические испытания

$$\bar{q}_{в.ф} = \bar{T}_{в.ф} \cdot \bar{C}_{в.ф}, \quad (10.8)$$

где $\bar{c}_{с.о.}$, $\bar{c}_{с.с.}$, $\bar{c}_{пф}$ - средние затраты в единицу времени на оплату труда персонала, привлекаемого соответственно для восстановления работоспособности после отказа, восстановления вычислительного процесса (достоверности информации) после сбоя, проведения профилактических испытаний.

Затраты на процессы обслуживания зависят от оснащенности этих процессов аппаратными и программными средствами поддержки, позволяющими сократить время выполнения соответствующих процедур и уменьшить трудовые затраты.

Для оценки совокупного влияния на продуктивность работы ЭВМ рассмотренных выше отдельных показателей надежности введем комплексный коэффициент использования

$$k_{И}^p = \frac{\sum_{i=1}^n t_i - \sum_{r=1}^m \tau_{с.ср} - \tau_k - \sum_{s=1}^p \tau_{пфс}}{\sum_{i=1}^n t_i + \sum_{j=1}^n (\tau_{в.о. j} + \tau_{о.ж. j})}, \quad (10.9)$$

где n , m , p - соответственно число отказов, сбоев и профилактических обслуживаний за рассматриваемый достаточно большой период наблюдения за эксплуатацией (без учета отказов и сбоев во время профилактических испытаний); t_i - интервал времени исправной работы между $(i-1)$ -м и i -м нарушениями функционирования машины из-за отказов; $\tau_{с.о. j}$ и $\tau_{о.ж. i}$ - время восстановления и время ожидания начала ремонта после j -го отказа; $\tau_{в.ср}$ - время восстановления вычислительного процесса после r -го сбоя (время, затраченное на повторное выполнение программы, части программы, команды и т.д.); τ_k - суммарное машинное время, затраченное в рассматриваемый период на контроль достоверности функционирования ЭВМ (двойной просчет, расчет контрольных вариантов, потери машинного времени на процедуры автоматического контроля правильности работы ЭВМ и т.п.); $\tau_{пф}$ - время, затраченное на s -е профилактическое обслуживание.

В знаменателе (10.9), стоит полное время наблюдения за эксплуатацией ЭВМ. Оно равно сумме интервалов времени между отказами и общего времени, затраченного на их устранение. При этом принято, что при операциях контроля достоверности работы ЭВМ, восстановления достоверности информации и при профилактических проверках машина находится в потенциально работоспособном состоянии, хотя и не используется для полезной работы.

Выражение (10.9) определяет отношение полезного или, точнее, потенциально возможного полезного времени работы машины к общему времени наблюдения за эксплуатацией ЭВМ.

Если не учитывать сбои и их последствия, а также потери времени на контроль достоверности работы машины и на ожидание начала ремонта после отказа, можно получить приводимое в литературе выражение для коэффициента использования

$$k_u = \frac{\bar{T}_0}{T_0 + T_{в.о} + \tau_{оп}}, \quad (10.10)$$

где $\tau_{оп}$ - среднее время профилактики, пересчитанное на один отказ. Приведенное выражение позволяет определить относительное время работоспособного состояния ЭВМ.

В технических условиях на ЭВМ обычно указывают коэффициент готовности ЭВМ

$$k_r = \frac{\bar{T}_0}{T_0 + T_{в.о}}, \quad (10.11)$$

который определяет вероятность пребывания ЭВМ в работоспособном состоянии в любой произвольный момент времени (в период между профилактиками).

Для оценки надежности ЭВМ в условиях эксплуатации (эксплуатационная надежность) надо в знаменатели выражений (10.10), (10.11) добавить $\bar{T}_{ож}$ - среднее время ожидания начала ремонта после отказа.

Между коэффициентами использования и готовности существует соотношение

$$k_u \leq k_r \quad (10.12)$$

Помимо рассмотренных следует учитывать и другие эксплуатационные характеристики ЭВМ.

Долговечность ЭВМ - свойство машины при установленном для нее обслуживании сохранять указанные в технической документации характеристики в течение определенного времени хранения и эксплуатации. При этом *сохранностью машины* называют свойство ЭВМ сохранять исправное состояние при хранении в условиях, оговоренных технической документацией.

Эксплуатационные ресурсы - это ресурсы, необходимые для нормальной эксплуатации машины: площадь помещений, потребляемая мощность, штат обслуживающего персонала, особые требования к параметрам окружающей среды в помещениях ЭВМ (температура, вентиляция, пылезащищенность и др.).

10.2. Эксплуатационная надежность ЭВМ

Внедрение средств и систем автоматизации в промышленности требуют повышение качественных требований к их надежности. Естественно, что неисправность или отказ в работе отдельного аппарата или элемента могут нарушить работу всей системы, в целом, и чем больше аппаратов, элементов входит в систему, тем больше вероятность, что в определенный отрезок времени произойдет отказ.

Надежность системы автоматизации в значительной степени определяется уже в стадии проектирования, т.е. в проект должна быть заложена определенная теоретическая надежность. Если расчетная надежность удовлетворяет требованиям производства и достигнута за счет разумных затрат, то это свидетельствует о высоком качестве проекта.

Для повышения надежности систем автоматизации необходимо проведение комплекса работ на различных этапах создания и функционирования этих систем. Этот комплекс включает, выбор требований к характеристикам надежности, разработка методов повышения надежности при проектировании систем, конструировании и изготовлении приборов и средств управления, монтаже, наладке и эксплуатации систем. Для проведения значительной части указанных работ необходимо использование результатов исследований надежности при эксплуатации, которые являются обратной связью в системе повышения надежности. Так, результаты эксплуатации используются при разработке и выпуске приборов для изучения причин и закономерностей возникновения отказов, определения наименее надежных узлов и элементов, выявления конструктивных, технологических и эксплуатационных факторов, влияющих на надежность, для разработки мероприятий и рекомендаций по повышению надежности путем усовершенствования конструкции и технологии изготовления приборов.

Эти результаты необходимы для разработки и усовершенствования методов эксплуатации - сроков и объемов профилактических работ, нормирования времени обслуживания, численности и расстановки обслуживающего персонала, нормативов запасных частей и приборов.

Наконец, полученные при исследовании данные являются исходными для расчета надежности и технико-экономической эффективности автоматизированных систем управления технологическими процессами.

Надежность характеризует способность средств и систем автоматизации выполнять свое назначение, сохраняя в процессе эксплуатации свои начальные технические характеристики в заданных пределах. В теории надежности все изделия принято делить на два больших класса: восстанавливаемые и невосстанавливаемые.

К восстанавливаемым изделиям относятся такие, которые в случае возникновения отказа могут быть восстановлены. Такими изделиями являются системы автоматизации, вычислительные машины, приборы и т.п. Невосстанавливаемыми считаются те изделия, которые в случае возникновения отказа не могут быть восстановлены или не подлежат восстановлению. К ним относятся полупроводниковые приборы, конденсаторы, резисторы, осветительные лампы, интегральные схемы и т.п.

Надежность является одним из свойств изделия и входит в более широкое свойство - качество (эффективность).

Качество - это совокупность свойств изделия, определяющих его пригодность для использования по назначению.

С точки зрения надежности системы автоматизации нас интересует, исправна она или неисправна.

Исправность - это состояние системы, при котором она в данный момент времени соответствует всем требованиям, установленным как в отношении основных параметров, характеризующих нормальное выполнение заданных функций, так и в отношении второстепенных параметров, характеризующих удобство эксплуатации, внешний вид и т.п.

Неисправность - это состояние системы, при котором она не соответствует хотя бы одному из требований, указываемых в технической документации.

Работоспособность - это состояние системы, при котором она способна выполнять заданные функции с параметрами, установленными требованиями, отмеченными в технической документации. Переход из состояния исправности в состояние неисправности происходит в результате события, называемого отказом. Таким образом, отказ - есть полная или частичная утрата работоспособности системы.

Отказы разделяются на внезапные (в результате резкого, скачкообразного изменения параметров изделий) и постепенные (разрегулировка, старение и износ изделий в процессе эксплуатации).

Таким образом, система автоматизации может находиться в различных состояниях. Время пребывания системы в состояниях исправности и работоспособности зависит от ее свойств, K таким свойствам относятся надежность, безотказность, долговечность и ремонтпригодность»

Надежность - свойство средств автоматизации или системы в целом, обусловленное их безотказностью, долговечностью и ремонтпригодностью и обеспечивающее нормальное выполнение заданных функций.

Коэффициент отражающий основные свойства надежности K_H , в общем виде можно записать так:

$$K_H = \prod (K_B, K_D, K_P), \quad (10.13)$$

где K_B , K_D и K_P - коэффициенты, учитывающие безотказность, долговечность и ремонтпригодность.

Безотказность - свойство средств автоматизации или системы в целом непрерывно сохранять работоспособность в определенных режимах и условиях эксплуатации.

Долговечность - свойство средств автоматизации или системы в целом длительно (с возможными перерывами на ремонт) сохранять работоспособность в определенных режимах и условиях эксплуатации до разрушения или другого предельного состояния.

Ремонтпригодность - свойство средств автоматизации или системы в целом, выражающееся в приспособленности к восстановлению и поддержанию работоспособности путем предупреждения, обнаружения и устранения отказов. Количественная характеристика заключается в затратах времени и денежных средств на обнаружение и устранение неисправности с учетом необходимой квалификации обслуживающего персонала.

Надежность в значительной степени зависит от условий эксплуатации. Если прибор используется в лабораторных условиях, его надежность выше, чем надежность такого же прибора, используемого вне помещения. Воздействие влаги, резких изменений температуры создают неблагоприятные условия для работы приборов. В

отличие от надежности свойство безотказности более узкое понятие. Так, для одних систем требуется безотказная работа только в течение короткого промежутка времени (например, ракета), а для других более длительный период (например, самолет).

Долговечность свидетельствует о способности системы длительно сохранять работоспособность с перерывами для необходимых ремонтов. Для разных по назначению систем каждое из этих свойств может иметь решающее значение. Например, для самолета на первое место выдвигается безотказность и уже затем учитывается долговечность. Для многих видов оборудования на первом плане стоит долговечность, а уже затем рассчитывается экономически обоснованная, требуемая условиями производства соответствующая безотказность.

Для невосстанавливаемых изделий понятия безотказности и долговечности практически совпадают, ибо при наступлении первого же отказа у них нарушается безотказность и исчерпывается долговечность. Чем сложнее становятся современные средства и системы автоматизации, чем более ответственные функции они выполняют, тем большее значение приобретает их ремонтпригодность. Построение блочных систем позволяет производить автоматический поиск неисправного блока, его замену и ремонт. Ремонтпригодность систем автоматики практически оказывается при двух видах обслуживания: при плановом (профилактическом) и внеплановом.

Цель внепланового обслуживания – быстрее восстановление работоспособности средств автоматики путем нахождения причин отказов, замены вышедших из строя узлов и деталей или проведения необходимого ремонта. Плановое профилактическое обслуживание предупреждает отказы путем осуществления таких мероприятий, как своевременная смазка, регулировка, настройка и т.д. Профилактическое обслуживание может также включать в себя и замену узлов и деталей, работающих на пределе своих возможностей, для предупреждения появления их износовых отказов. Наряду с ремонтпригодностью большое значение для надежности приборов и средств автоматизации имеет и их сохраняемость.

Большое влияние на изменение надежности оказывают объективные и субъективные факторы.

К объективным факторам относятся: естественные износы, изменение технического состояния под действием постоянных и переменных нагрузок; влияние температур, окружающей среды, электрической энергии; инерционные нагрузки, вибрации; режимы эксплуатации.

К субъективным факторам относятся: квалификация обслуживающего персонала; соблюдение нормальных режимов работы и правил технического обслуживания, своевременное проведение ремонта; небрежное хранение; низкая культура производства; нарушение технологии.

Для количественной оценки надежности используются различные показатели (критерии): интенсивность отказов; время безотказной работы; вероятность безотказной работы; частота отказов и другие.

Интенсивность отказов – это вероятность отказа изделия в единицу времени после данного момента времени при условии, что до этого момента отказ не возникал.

Интенсивность отказов равна отношению числа отказавших изделий ΔN за промежуток времени Δt к произведению количества изделий N , работающих к началу этого промежутка времени, на его продолжительность. В статистической интерпретации, при малом Δt и большом N , интенсивность отказов $\lambda(t)$ может быть записана так:

$$\lambda(t) = \frac{\Delta N}{N \Delta t} \quad (10.14)$$

Наряду с интенсивностью отказов используется обратная ей величина - среднее время наработки на отказ (T_{cp}). Среднее время наработки на отказ определяют как математическое ожидание случайной величины (времени наработки между отказами):

$$T_{cp} = \int_0^{\infty} P(t) dt \quad (10.15)$$

При статистическом определении этого параметра для N изделий можно воспользоваться формулой

$$T_{cp} = \sum_{i=1}^N \frac{t_i}{N}, \quad (10.16)$$

где t_i - время наработки i -го изделия до отказа.

Вероятность безотказной работы $P(t)$ за время t , т.е. вероятность того, что в определенных условиях эксплуатации в заданном интервале времени ($0-t$) не произойдет ни одного отказа, такова

$$P(t) = \int_0^{\infty} f(t) dt = e^{-\lambda t} \quad (10.17)$$

Статистическая интерпретация вероятности безотказной работы до момента t при общем количестве элементов N_0 и количестве отказавших элементов $n(t)$ к моменту t определяется по формуле

$$P(t) = \frac{N_0 - n(t)}{N} \quad (10.18)$$

Частота отказов определяет собой плотность распределения вероятностей наработки между отказами. В ряде случаев необходимо вычислять вероятность отказов за время t , т.е. за время безотказной эксплуатации изделия.

Вероятность отказа $q(t)$ и вероятность безотказной работы $P(t)$ находятся в следующей зависимости:

$$q(t) = 1 - P(t) \quad (10.19)$$

Этот параметр также определяется статистически. Следующим показателем надежности является коэффициент готовности K_r - это отношение продолжительности безотказной работы изделия за заданный период эксплуатации к сумме продолжительности безотказной работы и продолжительности ремонтов за этот же период эксплуатации.

$$K_r = \frac{T_{cp}}{T_{cp} + T_n}, \quad (10.20)$$

где T_n - среднее время восстановления работоспособности отказавшей системы.

Иногда удобнее, либо целесообразнее определять коэффициент простоя

$$K_{\Gamma} = 1 - K_{\Gamma} \quad (10.21)$$

Коэффициент готовности используется для систем автоматизации, предназначенных для длительной непрерывной работы при наличии возможности отключения этих систем, а также для систем, необходимость в работе которых может потребоваться в любой момент времени.

Для того, чтобы обеспечить возможность длительного использования средств автоматизации, необходимо регулярно проводить профилактические и регламентные работы. Во время этих работ приборы тщательно проверяются и регулируются. Для решения этих вопросов вводится коэффициент профилактики

$$K_{\text{пр}} = \frac{T_{\text{пр}}}{T_{\text{пр}} + T}, \quad (10.22)$$

где $T_{\text{пр}}$ - время, необходимое для профилактических осмотров; T время между профилактическими осмотрами.

Вероятность исправной работы сложной системы $P_c(t)$ равна произведению вероятностей исправной работы ее составных элементов:

$$P_c(t) = P_1(t)P_2(t)\dots P_n(t) \approx \prod_{i=1}^n P_i(t) \quad (10.23)$$

В условиях эксплуатации систем автоматизации требуются периодические профилактические осмотры, и для устранения повреждений необходимо время. Коэффициент готовности по существу представляет собой вероятность того, что в любой момент времени система будет находиться не в состоянии ремонта. Коэффициент профилактики аналогично будет вероятностью того, что система находится на профилактическом осмотре, а $(1 - K_{\text{пр}})$ - вероятность того, что система не находится в состоянии осмотра, а работает.

Отсюда эксплуатационная надежность системы выражается:

$$P_{\text{э.с}}(t) = P_c(t)K_{\Gamma}(1 - K_{\text{пр}}) \quad (10.24)$$

Рассмотренные показатели надежности позволяют учитывать надежность средств и систем автоматизации при выполнении ими различных задач.

Все мероприятия по повышению надежности можно разделить на две группы: повышение наработки на отказ $T_{\text{ср}}$ и повышение ремонтпригодности приборов и систем автоматизации (за счет уменьшения среднего времени восстановления) T_n . Мероприятия по повышению наработки на отказ должны быть направлены на повышение надежности всех элементов и средств автоматизации, из которых состоит система автоматизации.

Если даже 95% элементов будут иметь высокую наработку на отказ, а 5% низкую, наработка на отказ для всей аппаратуры в целом будет определяться пятью процентами. Поэтому при проведении количественного анализа надежности обслуживающему персоналу, в первую очередь, необходимо выявить наиболее ненадежные элементы, чтобы довести уровень их надежности до уровня остальных.

Кроме вышеперечисленных мероприятий, повышение надежности при эксплуатации систем автоматизации может достигаться путем научных методов эксплуатации; сбора и обобщения опыта эксплуатации, связи с производством и проектированием приборов и средств автоматизации и повышения квалификации работников эксплуатации.

10.3. Особенности ЭВМ как объекта эксплуатационного обслуживания

Эксплуатация любого объекта (системы, машины) в общем случае состоит из его (ее) эксплуатационного использования, другими словами, использования по прямому назначению, и эксплуатационного обслуживания. Под *эксплуатационным обслуживанием* понимается совокупность операции, процедур и процессов, предназначенных для обеспечения работоспособности объекта (системы, машины).

Эксплуатируемый объект может находиться в работоспособном или неработоспособном состоянии. *Работоспособным* называется состояние объекта, при котором он способен выполнять заданные функции при сохранении значения его характеристик и параметров в пределах, установленных технической документацией. *Неработоспособным* называется состояние объекта, при котором он не в состоянии выполнить хотя бы одну из заданных функций или хотя бы один его параметр или одна характеристика не удовлетворяет требованиям, указанным в технической документации.

В зависимости от особенностей рассматриваемого объекта, в частности от степени автоматизации его основных технологических процессов, меняются соотношения между эксплуатационным использованием и эксплуатационным обслуживанием в общем, процессе эксплуатации объекта. В соответствии с этим меняется содержание, вкладываемое в понятие эксплуатации того или иного объекта.

Наоборот, в ЭВМ, где управление вычислительным процессом формализовано и осуществляется автоматически операционной системой, процедуры работы операторов машины достаточно просты, под эксплуатацией ЭВМ понимают в основном ее эксплуатационное обслуживание.

В дальнейшем под термином «эксплуатация ЭВМ» будет пониматься главным образом ее эксплуатационное обслуживание.

Рассмотрим основные особенности ЭВМ как объекта эксплуатационного обслуживания.

ЭВМ - сложная техническая система. Современные ЭВМ средней и большой производительности следует отнести к сложным техническим объектам. Эта сложность определяется большим числом входящих в них элементов – и, в первую очередь, *электронных компонентов*, большим числом связей между элементами, наличием в составе машины разнообразного по принципу действия и выполняемым функциям оборудования (в том числе прецизионного), в ряде случаев работающего вблизи предела физических возможностей (по скоростям передачи информации, по плотности записи информации на носителе и т.п.). Сложность ЭВМ обуславливает

ся также сложностью выполняемых ею функций по формированию и обработке информации.

ЭВМ - совокупность аппаратурных и программных средств. Сложность ЭВМ как объекта эксплуатации усугубляется тем, что современная ЭВМ - это неразделимый комплекс аппаратуры и программных средств. Программные средства в тесном взаимодействии с аппаратурой управляют вычислительным процессом, процессами взаимодействия ЭВМ с пользователями и операторами.

ЭВМ - человеко-машинная система. Даже в простейших режимах работы ЭВМ выступает как человеко-машинная система, в которой оператор определенным образом взаимодействует и общается с машиной (точнее, с ее операционной системой). Этот человеко-машинный характер вычислительной системы значительно усиливается при реализации систем коллективного пользования, разделения времени, телеобработки, диалоговых режимов.

Неправильные действия операторов и пользователей могут вызывать ненормальности (причем часто трудно обнаруживаемые и устранимые) в функционировании ЭВМ.

ЭВМ - объект со сложным описанием большим объемом технической документации. Вычислительная машина как сложная система требует многоуровневого описания - на уровнях структур, функциональных схем, принципиальных схем, временных диаграмм, микропрограмм и т.д. Во многом эффективность эксплуатационного обслуживания зависит от структуры, полноты и качества документации, приспособленности ее для ведения эксплуатационного обслуживания.

Эксплуатационное обслуживание сопровождает ЭВМ на протяжении всей ее «жизни»: от момента изготовления до снятия с эксплуатации.

В общем случае можно выделить следующие виды обслуживания ЭВМ: хранение; установку, наладку на месте эксплуатации, ввод в эксплуатацию; обслуживание при нормальной работе; планово-профилактические работы; устранение неисправностей (ремонт); обслуживание программного обеспечения; обслуживание информационных баз.

Вычислительные машины можно классифицировать по характеру обслуживания, что определяется их назначением и условиями эксплуатации. Вычислительная машина может быть *восстанавливаемым* или *невосстанавливаемым обслуживаемым* или *необслуживаемым* объектом.

ЭВМ считается восстанавливаемым объектом, если во время эксплуатации может производиться ремонт по устранению возникающих неисправностей. В противном случае машина является невосстанавливаемым объектом.

ЭВМ считается обслуживаемым объектом, если допускается периодическое проведение профилактических испытаний с целью выявления, замены или подрегулировки элементов и узлов, параметры которых близки к предельно допустимым. В противном случае ЭВМ является необслуживаемым объектом.

ЭВМ общего назначения представляют собой восстанавливаемые обслуживаемые объекты. К невосстанавливаемым объектам относятся, например, бортовые вычислительные машины ракет.

Сложность ЭВМ как объекта эксплуатационного обслуживания, вытекающие отсюда требования к высокому уровню квалификации обслуживающего персонала, большее число ЭВМ, находящихся в эксплуатации, рассредоточенность их по территории страны делают весьма острой проблему обеспечения эксплуатационного обслуживания ЭВМ.

Решение этой проблемы следует искать в повышении надежности ЭВМ, в соответствующей организации их обслуживания, широкой подготовке специалистов по эксплуатационному обслуживанию, в придании ЭВМ специального свойства высокой степени *обслуживаемости*, т.е. приспособленности машины к процессам обслуживания.

Степень обслуживаемости ЭВМ тем выше, чем меньше количество и ниже квалификация труда, затрачиваемого на эксплуатацию ЭВМ. Повышение степени обслуживаемости ЭВМ достигается с помощью специальных аппаратных и программных средств, в том числе средств автоматизации поиска неисправностей, автоматического контроля правильности работы ЭВМ, автоматического восстановления вычислительного процесса после сбоев, автоматизации профилактических испытаний, автоматизации накопления и обработки информации о нарушениях нормального процесса работы при ее эксплуатации, а также средств дистанционного контроля и диагностирования ЭВМ.

10.4. Системный подход при разработке аппаратурно-программных средств обслуживания ЭВМ. Технология: «надежность - готовность - обслуживаемость»

В настоящее время приспособленность к обслуживанию (обслуживаемость) следует рассматривать как одну из основных характеристик машины, непосредственно влияющих на эксплуатационную надежность, оцениваемую обобщенными показателями - коэффициентами использования и готовности. Действительно, выражение (10.9) показывает, что коэффициент использования зависит не только от таких характеристик надежности, как безотказность и достоверность, но и от основных характеристик «обслуживаемости - ремонтпригодности», контролепригодности машины, а также от времени реакции системы обслуживания на вызов для устранения отказа.

Значения показателей надежности и обслуживаемости, входящих в (10.9), должны быть соответствующим образом сбалансированы. Например, при крупносерийном производстве не обладающих достаточной надежностью ЭВМ возникает очень большая нагрузка на систему сервиса и для достижения приемлемых значений коэффициента использования окажется необходимым вкладывать значительные средства и ресурсы в ее расширение. Между тем в подобном случае экономически выгоднее направить дополнительные средства на совершенствование схем и конструкции машины, технологии, изготовления и методики заводских тренировок и испы-

таний с целью повышения надежности машины и соответствующего снижения нагрузки на систему сервиса [5, 10].

Разработка концепции, методов и средств обеспечения надежности и обслуживаемости машины должна производиться во взаимной увязке и входить составной и неотъемлемой частью в общий процесс проектирования ЭВМ. Такой подход, подразумевает пристальное внимание к слабым в отношении надежности и обслуживаемости сторонам создаваемого проекта, тщательный анализ известных методов разработки, повышения *надежности, готовности и обслуживаемости* машины и их внедрение, многие специалисты склонны считать новой технологией проектирования средств вычислительной техники. Такого подхода придерживается, например, фирма IBM США, называя его RAS-технологией или RAS-системой [11, 13].

Проектирование ЭВМ с учетом RAS-технологии «Надежность - Готовность - Обслуживаемость» предполагает, в первую очередь, борьбу с ошибками ЭВМ, порождаемыми отказами и сбоями. Эта борьба ведется по двум основным направлениям:

- повышение надежности аппаратуры путем снижения интенсивности отказов и сбоев за счет применения электронных схем с высокой и сверхвысокой степенями интеграции, входного контроля компонентов, снижения уровня помех, облегченных режимов работы схем, термотренировок аппаратуры и т.п.;

- повышение готовности путем подавления в определенных пределах влияния отказов и сбоев на работу ЭВМ с помощью средств контроля и коррекции ошибок, а также средств автоматического восстановления вычислительного процесса после ошибок машины, включая аппаратную избыточность, на основе которой реализуются различные варианты отказоустойчивых архитектур ЭВМ.

Важным в рассматриваемой технологии проектирования является признание существенной зависимости основных эксплуатационных характеристик машины (коэффициентов готовности и использования других параметров) от свойств обслуживаемости ЭВМ и органическое включение разработки систем и средств повышения обслуживаемости в общий процесс проектирования машины.

В настоящее время общепринятым является представление о том, что сложные ЭВМ должны снабжаться комплексом аппаратурно-программных средств поддержки эксплуатации, органически включенных в архитектуру ЭВМ.

Чтобы определить, какие архитектурные свойства и аппаратурно-программные средства должны иметь ЭВМ для обеспечения высокой готовности и обслуживаемости, обратимся к выражению (10.9) для комплексного коэффициента использования.

Знаменатель в (10.9) есть полное время наблюдений за эксплуатацией машины, равное сумме общей продолжительности работоспособного состояния ЭВМ $\sum_{i=1}^n t_i$ и суммарной продолжительности восстановления после отказов с учетом времени ожидания ремонта $\sum_{i=1}^n (\tau_{a.oj} + \tau_{o.жj})$.

Из (10.9) следует, что для повышения комплексного коэффициента использования следует, с одной стороны, добиваться увеличения среднего времени наработки

машины на отказ, а с другой - повышать ремонтпригодность ЭВМ (уменьшать среднюю продолжительность восстановления после отказа) и снижать время простоя в ожидании начала ремонта. Принимаемые для этого технические и организационные мероприятия должны быть обоснованы экономически.

Так, например, значительное уменьшение времени простоя в ожидании ремонта может быть достигнуто при индивидуальном (децентрализованном) обслуживании, если все рабочие смены ЭВМ укомплектовать ремонтными бригадами специалистов и обеспечить наличие полного ЗИП. Однако такой подход во многих случаях экономически не оправдан, так как экономический эффект от уменьшения времени простоя может оказаться меньше расходов, связанных с содержанием при ЭВМ большого штата специалистов по эксплуатации машины и полного ЗИП. Решение этого и других подобных вопросов требует системного подхода, учитывающего взаимодействие технических, организационных и экономических сторон эксплуатации машин.

Основное время в процессе восстановления работоспособности после отказа занимает поиск (локализация) неисправности. Эти процедуры в среднем занимают около 60 % общего времени восстановления и требуют высокой квалификации обслуживающего персонала.

Пользователь должен быть уверен в правильности результатов вычислений и обработки данных на ЭВМ. Если при проектировании не принять специальных мер для обеспечения автоматического контроля правильности работы машины, то осуществлять такой контроль придется пользователю, и он будет его производить путем двойного счета или выполнения контрольных вариантов расчета, что приведет к потере фактической производительности машины вследствие увеличения члена τ_x в числителе формулы (10.9). Вместе с тем сбой или отказ в машине приводит к искажению информации (данных или программ), и если не принять специальных мер, такое искажение может привести к распространению ошибки и в итоге к искажению программ и данных. В результате существенно увеличивается время восстановления достоверности информации, что необходимо для продолжения решения задачи.

Для освобождения пользователя от забот по контролю правильности работы ЭВМ, недопущения распространений, последствий сбоев и отказов на программы и данные машину следует снабжать *системой автоматического контроля*, воспринимающей ошибку ЭВМ практически в момент ее возникновения и препятствующей дальнейшему выполнению программы.

Для сокращения потерь времени на восстановление вычислительного процесса после сбоя (восстановление достоверности информации) следует иметь *автоматическую систему восстановления вычислительного процесса*. На эту систему может быть возложено автоматическое повторение неправильно выполненной операции (в разных случаях повторению может подлежать микрокоманда, команда или участок программы) и при безошибочном исходе повторения — восстановление вычислительного процесса.

Системы автоматического контроля и восстановления обеспечивают высокую *конфиденциальность* ЭВМ.

Определение стратегии профилактических работ (периодичности и глубины профилактики) также требует системного подхода. Сокращение промежутков времени между

профилактиками, увеличение объема профилактических испытаний, естественно, будет способствовать уменьшению вероятности появления отказов и сбоев в период между профилактиками. Однако проведение профилактических испытаний связано с непроизводительными затратами рабочего времени ЭВМ, а также с затратами труда на эти испытания.

Для повышения эксплуатационной надежности вычислительной установки, принятия обоснованных и своевременных решений о производстве доработок, замене элементов и узлов, в которых развиваются постепенные отказы, важное значение имеет накопление и обработка информации об имевших место отказах и сбоях и о местах их возникновения. Эта задача решается автоматической *аппаратурно-программной системой регистрации и обработки данных об отказах и сбоях*.

Системы автоматического контроля, диагностирования и профилактики используются также при заводской и пусковой наладках, восстановлении после ремонта, в результате чего резко уменьшается время, затрачиваемое на эти процедуры.

Перечисленные выше автоматические системы, поддерживающие процессы обслуживания, существенно сокращают затраты на них времени и труда. Учитывая сложность и компактность аппаратуры современных ЭВМ, правильнее будет сказать, что указанные выше автоматические системы делают обслуживание ЭВМ осуществимым. Без этих систем эксплуатация современных ЭВМ была бы практически невозможной.

Разработка концепции обслуживания ЭВМ должна являться органической составной частью начального этапа проектирования ЭВМ, когда определяются основные особенности архитектуры ЭВМ. Исходными данными для разработки концепции обслуживания являются эксплуатационные характеристики ЭВМ, такие как средние времена наработки на отказ и сбой, средние времена восстановления, коэффициенты использования и готовности.

Концепция обслуживания включает в себя представление о форме организации обслуживания (централизованное, индивидуальное, смешанное), составе и характеристиках аппаратурно-программных средств поддержки обслуживания, функциях обслуживающего персонала.

Современная методология проектирования ЭВМ требует, чтобы аппаратурно-программные средства поддержки обслуживания проектировались параллельно с разработкой аппаратурных и системных программных средств ЭВМ.

10.5. Некоторые сведения из теории вероятностей

Показатели надежности, описывающие процесс эксплуатации ЭВМ, носят случайный характер. Так, если встает задача определения вероятности того, что в течение некоторого интервала времени t , ЭВМ сохранит работоспособность, то для ее решения надо: знать закон распределения случайной величины - времени безотказной работы ЭВМ. Время поиска неисправности, время ремонта отказавшего устройства также являются случайными, поэтому в момент возникновения отказа можно говорить только о вероятности того, что работоспособность ЭВМ будет восстановлена

к заданному сроку. Конечно, определенные организационные и технические мероприятия могут повлиять на время восстановления ЭВМ, однако оно по-прежнему остается случайным, непредсказуемым (можно говорить только о вероятности того, что восстановление будет закончено к такому-то сроку, а для определения этой вероятности необходимо знание закона распределения случайной величины - времени восстановления).

Законы распределения случайных величин (интервалов времени между отказами и сбоями, времени восстановления и т.д.) дают исчерпывающую информацию о потоках отказов, сбоев и восстановлений. Таким образом, отказы ЭВМ, завершения поиска неисправности, окончания ремонтных работ и т.д. - это случайные события, которые в течение некоторого интервала времени могут произойти или не произойти; предсказать заранее момент наступления случайного события невозможно.

Однако это не означает, что персонал, обслуживающий ЭВМ, не может определенным образом прогнозировать поведение ЭВМ в процессе эксплуатации и принимать своевременно меры для поддержания ее в работоспособном состоянии.

Существуют методы оценки (с помощью системы численных показателей) надежности ЭВМ, основанные на случайном (вероятностном) характере поведения вычислительной машины в процессе эксплуатации.

При этом создается математическая модель процесса эксплуатации ЭВМ как сложной системы, подверженной влиянию случайных факторов. Очевидно, что математическая модель процесса эксплуатации ЭВМ должна основываться на методах теории вероятностей. Так, законы распределения случайных величин (время безотказной работы, поиска неисправности, ремонта и др.) задают в совокупности математическую модель процесса эксплуатации ЭВМ на языке теории вероятностей, а порознь - модели отдельных эксплуатационных явлений.

Поэтому в теории эксплуатации ЭВМ широко используются понятия и методы теории вероятностей. Рассмотрим кратко некоторые сведения из теории вероятностей. Введем понятие *вероятности события* - численной меры объективной возможности случайного события, обозначаемой как $P(A)$, где A - случайное событие. Вероятность события равна 1, если оно всегда наступает в результате испытания (события, которое можно заранее предсказать); это событие называют достоверным. Вероятность события равна 0, если оно никогда не может произойти в результате проведения испытания (невозможное событие). Таким образом, для случайного события $0 < P(A) < 1$.

В результате одного испытания может наступить и не одно случайное событие. *Полной группой* событий называют несколько событий, одно из которых обязательно должно иметь место в процессе испытания. Если несколько событий никогда не могут появиться одновременно в процессе испытания, то это *несовместимые события*.

Вероятность события может быть оценена из рассмотрения возможных результатов испытания. Так, если имеется n различных исходов испытания, причем все они равновероятны, то вероятность $P(A)$ события A

$$P(A) = \frac{m}{n}, \quad (10.25)$$

где m - число исходов испытания, которые означают, что наступило событие A . Предположение о равновозможности исходов может вводиться, например, из соображения симметрии.

Для широкого круга частота появления определенного события в серии независимых испытаний, проведенных при однотипных условиях, подчиняется устойчивым закономерностям: отношение m/n , где n - число проведенных испытаний, а m - число появлений события A при достаточно больших n , во многих случаях сохраняет почти постоянное значение. При этом большие отклонения появляются тем реже, чем больше n . Величину m/n называют статистической вероятностью события A . Из вышеизложенного следует, что статистическая вероятность при увеличении числа испытаний стремится к некоторому значению, которое и принимают равным вероятности события A .

Например, если в течение периода эксплуатации ЭВМ возникает несколько типов отказов (событий различного типа), то подсчитав за достаточно длинный интервал времени общее число отказов n , и число m_A отказов данного типа (событие A), можно определить вероятность события A как

$$P(A) = \frac{m_A}{n} \quad (10.26)$$

Если события A и B несовместимы, то вероятность события, состоящего в появлении хотя бы одного из событий A или B (так называемой суммы событий A и B), определится выражением

$$P(A+B) = P(A) + P(B), \quad (10.27)$$

$P(A)$, $P(B)$ - вероятности появления событий A и B соответственно.

Если события совместимы, то

$$P(A+B) = P(A) + P(B) - P(AB), \quad (10.28)$$

где $P(AB)$ - вероятность одновременного появления событий A и B (произведения событий).

Если появление события A влияет на вероятность появления события B , то говорят, что данные события зависимы. Условной вероятностью $P(A|B)$ называют вероятность появления события A с учетом того, что событие B имело место, причем

$$P(A|B) = P(A)P(BA) \quad (10.29)$$

$$P(A|B) = P(B)P(AB) \quad (10.30)$$

Если события независимы, то

$$P(AB) = P(A)P(B) \quad (10.31)$$

Эти правила могут быть обобщены и на случай нескольких событий.

В процессе эксплуатации эффективность функционирования ЭВМ можно оценивать по числу отказов определенного типа, по времени, прошедшему от момента отказа до окончания ремонта, по времени от момента окончания ремонта до момента следующего отказа и т.д. Другими словами, для описания процесса эксплуатации можно использовать случайные величины различного рода: дискретные (такие как число отказов) и непрерывные (такие как длительность восстановления или время между отказами). Случайная величина описывается соотношениями между значениями случайной величины и вероятностями их появления. Эти соотношения задаются *законом распределения случайной величины*.

Так, задать закон распределения дискретной случайной величины X означает перечислить все ее возможные значения x_1, x_2, \dots (их может быть конечное и счетное множество) и соответствующие им вероятности появления P_1, P_2, \dots

$$P_i = P\{X = x_i\}, i = 1, 2, \dots \quad (10.32)$$

причем

$$\sum P_i = 1 \quad (10.33)$$

Описать аналогично непрерывную случайную величину невозможно. Можно говорить только о вероятности того, что значение непрерывной случайной величины X не будет больше x :

$$F(x) = P\{X < x\}, \quad (10.34)$$

где $F(x)$ - функция распределения вероятностей для случайной величины X .

Очевидно, что какой бы ни была случайная величина X , $F(-\infty) = 0$, $F(+\infty) = 1$. В теории эксплуатации ЭВМ приходится иметь дело только со случайными величинами, определенными на интервале $[0, \infty]$; для них $F(0) = 0$, $F(\infty) = 1$.

Если случайная величина X может принимать только значения из конечного интервала $[a, b]$, то говорят, что X имеет усеченное распределение.

Для описания непрерывной случайной величины используется также плотность распределения вероятностей $f(x)$, представляющая собой производную от функции распределения $F(x)$:

$$f(x) = F'(x) \quad (10.35)$$

откуда

$$F(x) = \int_a^x f(u) du \quad (10.36)$$

График $f(x)$ называется кривой распределения вероятностей.

Вероятность попадания случайной величины X в интервал $[x, x+\Delta x]$ приблизительно равна $f(x)\Delta x$.

Вероятность попадания X интервал (a, b) выражается формулой:

$$P\{a < X < b\} = \int_a^b f(x) dx = F(b) - F(a), \quad (10.37)$$

причем так как $P(X < a) = 0$, то

$$P\{a < X < b\} = F(b) - F(a) \quad (10.38)$$

Иногда для определения вероятностных характеристик процесса эксплуатации ЭВМ необходимо отыскивать закон распределения функции случайных величин, например закон распределения суммы двух независимых случайных величин X и Y . Если плотности распределения случайных величин X и Y соответственно $f_1(x)$ и $f_2(x)$, то плотность распределения $g(z)$ случайной величины $Z = X + Y$ может быть определена по одной из формул [8, 11, 13]

$$g(z) = \int_{-\infty}^{\infty} f_1(x) f_2(z-x) dx;$$

$$g(z) = \int_{-\infty}^{\infty} f_2(y) f_1(z-y) dy \quad (10.39)$$

Все множество значений, которые может принять случайная величина из области определения, называется *генеральной совокупностью*.

Генеральная совокупность значений случайной величины кроме закона распределения характеризуется рядом числовых величин, таких как *момент (начальный и центральный) r -го порядка*.

Начальным моментом r -го порядка непрерывной случайной величины (а именно такими величинами являются времена между отказами и времена восстановления) называется величина, определяемая выражением [8, 11, 13]

$$\alpha_r[X] = \int_{-\infty}^{\infty} x^r f(x) dx, \quad (10.40)$$

где $f(x)$ - плотность распределения вероятностей случайной величины x ; $\alpha_r[x]$ - начальный момент.

С понятием центрального момента связано понятие центрированной случайной величины

$$X^* = X - \alpha_r[X], \quad (10.41)$$

где $\alpha_r[x]$ - математическое ожидание величины X , которое обычно обозначается $M[X]$.

Центрированная случайная величина X^* показывает отклонение X от математического ожидания.

Центральным моментом r -го порядка μ_r называется величина, определяемая формулой

$$\mu_r = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - M[x]) \cdot f(x) dx \quad (10.42)$$

Для описания генеральных совокупностей кроме математического ожидания используют центральные моменты второго - четвертого порядков.

Центральный момент второго порядка, называемый *дисперсией случайной величины*, определяется формулой

$$D[X] = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) (x - M[X])^2 dx \quad (10.43)$$

Дисперсия характеризует степень отклонения значений случайной величины от ее математического ожидания. Величина $\sigma_x = \sqrt{D[X]}$ называется *средним квадратическим отклонением*; эта величина используется наряду с $D[X]$. Безразмерный коэффициент вариации, определяемый как отношение среднего квадратического отклонения к математическому ожиданию, численно определяет степень отклонения случайной величины от математического ожидания.

Отношение центрального момента третьего порядка к кубу среднего квадратического отклонения называется *коэффициентом асимметрии*

$$\eta_3 = \mu_3 / \sigma^3, \quad (10.44)$$

который используется для описания формы кривой плотности распределения вероятностей.

Рассмотрим законы распределения случайных величин наиболее широко используемые в теории эксплуатации ЭВМ.

Для описания дискретных случайных величин используются законы распределения вероятностей, приведенные ниже.

1. Дискретное *пуассоновское распределение* с параметром λ :

$$P\{X = k\} = \frac{\lambda^k}{k!} e^{-\lambda}, \quad 0 \leq k < \infty, \quad (10.45)$$

где k - целое число.

Для пуассоновского распределения математическое ожидание, дисперсия и центральный момент третьего порядка равны λ , а коэффициент вариации равен $1/\sqrt{\lambda}$.

2. *Геометрическое распределение* с параметром p :

$$P\{X = k\} = (1-p)^{k-1} p, \quad 1 \leq k < \infty, \quad (10.46)$$

где k - целое число; $0 < p < 1$.

Математическое ожидание случайной величины X , имеющей геометрическое распределение, равно $1/p$, дисперсия $(1-p)/p^2$, коэффициент вариации $\sqrt{1-p}$.

4. Если дискретная случайная величина является усеченной, принимающей значения, например, в интервале $0 \leq X \leq n$, то возможно применение *биномиального распределения*, задаваемого выражением.

$$P\{X = k\} = C_n^k p^k (1-p)^{n-k}, \quad (10.47)$$

где k - целое число; $0 < p < 1$.

Математическое ожидание случайной величины, имеющей биномиальное распределение, равно np , дисперсия $np(1-p)$, коэффициент вариации $\sqrt{(1-p)/pn}$.

10.6. Модели потоков отказов и сбоев в ЭВМ

Под аналитической моделью некоторого процесса понимают совокупность математических зависимостей, описывающих его протекание с подробностью и точностью, соответствующей решаемой задаче исследования процесса. Поведение ЭВМ при эксплуатации зависит от ряда случайных факторов, таких как возникновение отказов, сбоев, восстановление работоспособности машины.

Безотказность аппаратуры зависит от времени ее функционирования (кривая 1 на рис. 10.1). В начале периода функционирования на этапе обнаружения и исправления ошибок проектирования и производственных дефектов интенсивность отказов аппаратуры уменьшается со временем - затем в течение большей части срока службы она остается примерно постоянной. Именно этот период эксплуатации представляет наибольший интерес. В конце срока службы интенсивность потока отказов значительно увеличивается вследствие износа аппаратуры. Особенности зависимости безотказности программных средств от времени (кривая 2 на рис. 10.1) [5].

Рассмотрим основные характеристики потока отказов, базирующиеся на законе распределения интервала времени между отказами.

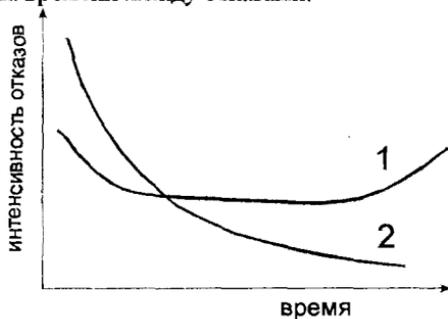


Рис. 10.1. Зависимость интенсивности отказов от времени эксплуатации аппаратурных (1) и программных (2) средств

Основной характеристикой является вероятность безотказной работы ЭВМ $P(t)$ - вероятность того, что ЭВМ сохранит работоспособность до момента времени t . Если $F(t)$ - функция распределения времени безотказной работы ЭВМ T_0 , то вероятность безотказной работы $P(t)$ - это функция дополнительная к $F(t)$:

$$P(t) = P\{T_0 > t\} = 1 - F(t) \quad (10.48)$$

если $P(0) = 1$; $P(\infty) = 0$, т. е. в момент начала эксплуатации с вероятностью 1 ЭВМ исправна, при завершении срока эксплуатации ЭВМ практически непригодна к использованию.

Функцию $F(t)$ часто называют вероятностью отказа, а также функцией ненадежности или функцией риска и обозначают $Q(t)$:

$$Q(t) = 1 - P(t) = F(t) \quad (10.49)$$

Используя функцию распределения $F(t)$, можно определить такой параметр, как среднее время безотказной работы:

$$T_0 = M[T_0] = \int_0^{\infty} t f(t) dt, \quad (10.50)$$

где $f(t) = dF(t)/dt$ - плотность распределения случайной величины T .

Для сокращения времени простоя ЭВМ при профилактических испытаниях часть этих испытаний выполняется в мультипрограммном режиме параллельно с решением задач на ЭВМ. Обычно организуется параллельное (мультипрограммное) выполнение тестов для аппаратуры, не охваченной контролем и не участвующей в вычислительном процессе. Модель профилактических испытаний для этого случая приведена в [5, 8].

ГЛАВА 11. Организация эксплуатации и ремонта ЭиВС

11.1. Основные задачи эксплуатации

На предприятиях различных отраслей промышленности находятся значительное количество различных приборов и средств автоматизации. В дальнейшем предусматривается значительно повысить степень автоматизации производственных процессов, что увеличит насыщенность промышленности контрольно-измерительными приборами и средствами автоматизации. Максимальную эффективность автоматизации можно получить только в том случае, если она безотказно работает и отвечает эксплуатационным требованиям.

Эксплуатацией средств и систем автоматизации называется обслуживание включенных и находящихся в работе автоматических устройств. Правильная организация эксплуатации установленных средств и систем автоматизации имеет исключительно важное значение для промышленности. Выход из строя отдельных приборов и систем автоматики, расположенных в цехах, лишает дежурный персонал возможности правильно вести технологический процесс, приводит к снижению производительности агрегатов, преждевременному износу оборудования, к различным неполадкам и даже авариям. Поэтому крайне важно обеспечить бесперебойную работу приборов и систем автоматизации, правильно организовав обслуживание работающих ЭиВС и приборов, их своевременный качественный ремонт и проверку.

Для обеспечения нормальной эксплуатации средств и систем автоматизации следует знать основные причины вызывающие нарушения; конструктивные недоработки некоторых типов средств автоматизации (применение средств автоматизации общепромышленного назначения, не приспособленных для работы в условиях данной отрасли промышленности; низкая ремонтпригодность - недопустимость осмотра, замены для ремонта отдельных блоков без их демонтажа; недостаточная, герметичность блоков и аппаратов); некачественное изготовление средств автоматизации на заводах; некачественный монтаж систем автоматизации; низкий уровень эксплуатации; несоблюдение порядка, объема и методов профилактических и ремонтных работ; неравноценная замена заводских деталей средств автоматизации деталями собственного изготовления; применение нестандартных предохранителей; отключение средств автоматизации на продолжительное время при мелких неисправностях; неточная установка напряжения питания; нарушение правил включения и отключения; переключение цепей под током; произвольная регулировка средств автоматизации; естественный износ, старение окисление и другие изменения в средствах автоматизации.

В связи с этим при обслуживании средств и систем автоматизации следует выполнять: тщательную приемку вводимых в эксплуатацию средств и систем автоматизации; четкую организацию текущего надзора и обслуживания действующих систем автоматики; периодическое определение правильности показаний измерительных приборов; наблюдение за качеством работы устройств автоматического управления и регулирования и анализ их работы; наблюдение за действием устройств автоматического контроля и проведение периодической проверки их действия; текущий, средний и капитальный ре-

монтаж средств автоматизации; повышение точности измерений, улучшение качества работы и совершенствование средств автоматизации; периодическую поверку средств автоматизации,

Кроме того, на предприятиях должны быть организованы систематизация и распространение опыта эксплуатации средств и систем автоматизации; систематическая работа по повышению технической квалификации обслуживающего персонала и участие в составлении и обсуждении новых проектов автоматизации, а также наблюдение за качеством выполнения монтажных работ.

Как установлено практикой, большинство измерительных приборов, находящихся в эксплуатации, нуждается только в мелком ремонте и лишь незначительная часть требует капитального ремонта.

11.2. Организация службы контроля измерительных приборов

Для практического обеспечения надежной работы измерительной техники, средств и систем контроля и автоматического управления производственными процессами на предприятиях создают специальную службу контрольно-измерительных приборов и автоматики КИПиА. Организационная форма этой службы зависит от структуры и мощности предприятия.

Основной задачей службы КИПиА является обеспечение выполнения положения о планово-предупредительном ремонте контрольно-измерительных приборов и средств автоматизации.

Сущность системы планово-предупредительного ремонта заключается в том, что через определенное число отработанных часов производятся осмотры, периодические проверки и различные виды ремонтов, чередование и периодичность которых определяется назначением прибора и условием его эксплуатации.

Служба КИПиА предприятия должна осуществлять следующие мероприятия: текущее обслуживание, проверку, техосмотр, ремонт измерительной техники, средств и систем контроля и автоматического управления производственными процессами; выполнение монтажных и наладочных работ в процессе эксплуатации; выполнение мероприятий по усовершенствованию и развитию автоматизации, рекомендованных вышестоящими организациями, проектными и научно-исследовательскими институтами, координационными совещаниями и семинарами по обмену передовым опытом и участие в соответствующих работах совместно с научно-исследовательскими и проектно-наладочными организациями; выполнение необходимых измерений и наблюдение при испытаниях технологического оборудования; приемку измерительной техники, средств контроля и автоматического управления, поступающих на предприятие; составление соответствующих актов и рекламаций и соблюдение предусмотренных инструкциями условий хранения этих средств; составление квартальных годовых и прочих заявок на измерительную технику, средства контроля и автоматического управления, лабораторное оборудование материалы и запасные части, инвентарь и мебель, используемые службой КИПиА; изучение и обобщение опыта эксплуатации средств и систем контроля и автома-

тического управления в условиях данного предприятия и пропаганду достижений службы КИПиА с целью распространения опыта на других предприятиях. Обучение персонала производственных и вспомогательных цехов правильным методам эксплуатации средств и систем контроля и автоматического управления производственными процессами; повышение квалификации работников службы КИПиА, обучение их безопасным методам работы. Ведомственный надзор за измерительной техникой (в соответствии с "Положением о ведомственном надзоре") в тех случаях, когда служба КИПиА организационно совмещена с метрологической службой предприятия.

По характеру своей работы служба КИПиА делится на два основных участка: участок эксплуатации; ремонтно-поверочный участок.

Участок эксплуатации следит за правильностью эксплуатации приборов: производит периодические поверки и текущие ремонты приборов на месте, определяет дефекты приборов в случае выхода их из строя, сдает приборы на ремонтно-поверочный участок для текущего или капитального ремонта и участвует в проверке их качества (после ремонта).

Участок эксплуатации КИПиА состоит из отдельных групп по участкам, на которые разбито все предприятие. В основном каждый эксплуатационный участок охватывает соответствующий технологический цех. За обслуживающим персоналом эксплуатационных групп закрепляются определенные, по возможности однотипные установки с приборами, за которые они несут ответственность. Однотипность установок на эксплуатационном участке улучшает условия эксплуатации этого оборудования. Количество и квалификация обслуживающего персонала каждого участка определяются количеством и сложностью установленных приборов.

Ремонтно-поверочный участок производит капитальный, а также текущий ремонт приборов предприятия, которые не могут быть отремонтированы на месте их эксплуатации, следит за правильностью работы лабораторных, контрольных и образцовых приборов, производит их ремонт и проверку, а также сдачу госповерителю как представителю ведомственного надзора. Все работы, связанные с ремонтом приборов, отмечаются в журнале ремонта контрольно-измерительных приборов.

Ремонтно-поверочный участок несет ответственность за сохранность и точность всех образцовых мер и измерительных приборов.

Штаб этого участка составляют прибористы, между которыми производится разделение функций в зависимости от группы обслуживаемых приборов. Один приборист может обслуживать несколько групп приборов. Количество прибористов и их функции определяются количеством, видом и сложностью приборов и регуляторов, находящихся в эксплуатации на данном предприятии.

При испытаниях и внедрении новых типов приборов группа КИПиА обязана принимать активное участие и способствовать нормальным условиям испытаний, а также принимать участие в совершенствовании как вновь созданных, так и серийно выпускаемых приборов и средств автоматизации.

Штаб службы КИПиА определяется в прямой зависимости от объема работ, выполняемого на основании единых норм времени на ремонтные и поверочные работы, от количества находящихся в эксплуатации приборов и регуляторов и от установленных

сроков периодической поверки и сроков профилактического среднего и капитального ремонта.

11.3. Обслуживание и ремонт электронных средств

В соответствии с назначением, объемом, составом работ и периодичностью их выполнения профилактические работы подразделяются на планово-предупредительные работы (ППР) и внеплановые.

В состав планово-предупредительных работ входят: ежесменное (ежесуточное) техническое обслуживание приборов, выполняемое в течение всей смены (суток); периодическое техническое обслуживание, выполняемое согласно плану-графику.

Ежесменное (ежесуточное) техническое обслуживание представляет собой комплекс мероприятий, направленных на создание наиболее благоприятных условий для работы средств и систем контроля и автоматического управления; текущее обслуживание заключается в систематическом выполнении операций, которые обеспечивают нормальное функционирование средств автоматизации, и в выявлении дефектов, возникающих при эксплуатации приборов и средств автоматизации.

Периодическое техническое обслуживание приборов и средств автоматизации (периодические поверки) проводится согласно утвержденному графику планово-предупредительных работ, разрабатываемому в зависимости от характера производства и режима работы (сменности) на предприятиях. В объем работ при проведении периодической проверки входят: осмотр прибора для определения его технического состояния, проверка точности прибора и определение при необходимости соответствующего вида ремонта.

В соответствии с назначением, характером и объемом выполняемых работ ремонты подразделяются на следующие виды: текущий и капитальный.

При текущем ремонте производится устранение мелких дефектов и отдельных неисправностей в узлах, препятствующих нормальной работе изделия. Текущий ремонт предусматривает чистку изделия с частичной его разборкой и заменой поврежденных деталей и узлов. В случае ремонта измерительной части прибора производится обязательная его поверка. Текущий ремонт производится силами ремонтно-поверочного участка службы КИПиА либо непосредственно на месте, либо в ремонтной мастерской. В последнем случае заполняется дефектный ярлык за подписью ответственного лица ремонтной службы.

При капитальном ремонте изделия приходится заменять основные детали, производить регулировку и подгонку как механических деталей, так и электрической схемы.

Ремонт приборов может производиться двумя способами: индивидуальным и обезличенным.

При индивидуальном способе основные детали и узлы после их ремонта устанавливаются на то же изделие, с которого они были сняты.

При обезличенном способе ремонта замена отдельных деталей и узлов в приборе производится за счет отремонтированных деталей и узлов, ранее снятых с других приборов, или из новых деталей и узлов.

Организация работ по техническому обслуживанию и ремонту предусматривает: централизованный ремонт изделий (подрядный способ), который производится на специализированных заводах по ремонту приборов для предприятий данного экономического района или в специализированных цехах по ремонту контрольно-измерительных приборов и регулирующих устройств, обслуживающих предприятия данного района.

Целесообразность применения того или другого вида ремонта зависит от наличия парка измерительных и регулирующих приборов данного предприятия, наличия в экономическом районе предприятий централизованного ремонта и других факторов.

Централизованный ремонт приборов на специализированных предприятиях и в цехах КИПиА предприятий является основной формой организации профилактических и ремонтных работ.

К обслуживанию изделий допускаются лица, знающие конструкцию изделия и правила эксплуатации и имеющие соответствующую квалификационную подготовку.

Для лучшей сохранности приборов, правильной эксплуатации и поддержания их в хорошем техническом состоянии приборы закрепляются за обслуживающим персоналом.

С целью восстановления нормальной работы отдельных приборов или систем при выходе их из строя необходимо иметь на предприятии определенное количество запасных деталей и приборов.

Общее число работников службы КИПиА зависит от суммарных трудозатрат, разрядов и периодичности работ с учетом возможного развития систем автоматизации на предприятии и расширения парка приборов,

Численность персонала службы КИПиА предприятия, включая инженерно-технических работников, ориентировочно может быть определена по следующей формуле:

$$D_s = \frac{(A+B_1/n_1+B_2/n_2+B_3/n_3+\dots+B_i/n_i)K_3}{C} \text{ (чел.)}, \quad (11.1)$$

где A - суммарные затраты времени на текущее обслуживание средств автоматизации, производимое один раз в смену или чаще, чел·мин/смен.; B_1, B_2, B_i - суммарные затраты времени на текущее обслуживание средств автоматизации, производимое реже одного раза в смену, чел·мин.; n_1, n_2, n_i - количество рабочих смен в интервале времени между двумя очередными обслуживаниями одних и тех же приборов; C - длительность одной смены, мин/смен.; K_3 - коэффициент запаса, учитывающий необходимость выполнения непредвиденных работ. ($K_3 = 1,1$ - если средства автоматизации установлены в помещениях; $K_3 = 1,15$ - если средства автоматизации установлены в помещениях с относительной влажностью более 60% или имеются химически активные среды или пыль.)

Списочная численность дежурного персонала в сутки, с учетом подменного персонала, определяется так:

$$D_{\text{см}} = \frac{D_s(n+1)}{K} \text{ (чел.)}, \quad (11.2)$$

где n - число рабочих смен в сутки; K - коэффициент списочного штата рабочих, $K = \mathcal{E}/H$; \mathcal{E} - эффективный фонд рабочего времени одного работника в год (час); H - номинальный фонд времени.

Для рабочих, имеющих 12-дневный дополнительный отпуск при 7-часовом рабочем дне, следует принимать $\mathcal{E}_1 = 1795$ час., $K_1 = 0,85$; при 6-дневном дополнительном отпуске: $\mathcal{E}_2 = 1851$ час., $K_2 = 0,87$; при отсутствии дополнительного отпуска: $\mathcal{E}_3 = 1893$ час., $K_3 = 0,89$; при 12-дневном дополнительном отпуске и 6-часовом рабочий дне: $\mathcal{E}_4 = 1590$ час., $K_4 = 0,87$.

Явочная численность персонала, выполняющего поверочные, пуско-наладочные, ремонтные работы и техосмотры, определяется:

$$P_p = B_p \cdot K_p / \mathcal{E} \text{ (чел. в год)}, \quad (11.3)$$

где B_p - суммарные затраты времени на ремонтные, поверочные, пуско наладочные работы и техосмотры, выполняемые персоналом определенной квалификации в течение года, чел. час.

Списочная численность персонала, выполняющего поверочные, пусконаладочные, ремонтные работы и техосмотры, определяется:

$$P_{сп} = \frac{P_p}{K} \text{ (чел. в год)}. \quad (11.4)$$

Для сезонных производств, на которых дежурный персонал привлекается к ремонтным работам в период простоя завода, списочная численность ремонтного персонала определяется:

$$P_{сн.с.} = P_{сп} - K_n(1 - T_p)D_{сн.с.} \text{ (чел. в год)}, \quad (11.5)$$

где T_p - период работы завода в долях года; K_n - коэффициент, учитывающий некоторые потери, испытываемые ремонтной службой КИПиА в связи с недостаточной подготовленностью дежурного персонала к ремонтным работам и неравномерностью самих работ. Значение K_n принимается равным 0,85.

11.4. Особенности эксплуатации устройств вычислительной техники

Все вычислительные устройства обычно размещают в сухих, светлых и хорошо вентилируемых помещениях. Для размещения типового комплекта должны быть предусмотрены, помимо машинного зала, вспомогательные помещения: для подготовки данных, ремонта, а также для хранения запасных инструментов, придаваемых машине. Покрытие полов машинного зала рекомендуется осуществлять звукопоглощающим материалом, не склонным к генерации и накоплению электростатических зарядов. Стенки также желательно выполнять из материалов, снижающих уро-

вень шума в помещении. Освещенность должна быть диффузионная, общая с применением электролюминесцентных ламп с рефлекторами. Рекомендуется комбинация электролюминесцентных ламп с лампами накаливания. Осветительную аппаратуру необходимо располагать под потолком.

Для машинного зала желательно применение системы кондиционирования воздуха с поддержанием температуры ($17 \div 25$)°C и влажности $65 \pm 1.5\%$.

Допускается эксплуатация ЭВМ в помещениях с диапазоном изменений температуры в пределах от 5 до 40° и влажности окружающего воздуха при 30°C от 40 до 95%

Для обслуживания устройств вычислительной техники и ЭВМ требуется достаточно квалифицированный обслуживающий персонал, способный решать все инженерно-технические вопросы, возникающие при эксплуатации. К эксплуатации ЭВМ допускаются специалисты, сдавшие экзамены на предприятии-изготовителе ЭВМ по знанию устройства ЭВМ, схемной документации, технического описания и получившие удостоверение.

Профилактические работы производятся с целью обеспечения бесперебойной работы. Объем профилактических работ зависит от технического состояния средств вычислительной техники и квалификации обслуживающего персонала.

При ежедневной профилактике проводится тщательный осмотр устройств и механизмов на отсутствие посторонних предметов, чистка и протирание внешних частей от пыли, проверка стабилизированных напряжений питания машины. Двери и колпачки должны быть закрыты.

При ежемесячной профилактике, кроме ежедневной профилактики, должен производиться прогон комплексной наладочной тестовой программы. Тест должен выполняться без сбоев. Дополнительно производится очистка средств вычислительной техники от пыли.

Во время эксплуатации ЭВМ должен вестись документальный учет работ в соответствии с формуляром. При эксплуатации устройств вычислительной техники и ЭВМ следует выполнять следующие мероприятия: запрещается работа на машине при неисправной или выключенной системе вентиляционных узлов и защите; запрещается взамен сгоревших предохранителей устанавливать номиналы предохранителей, не соответствующих документация; запрещается включать машину при неисправной защите питания; запрещается эксплуатация машины при температуре окружающей среды более 40°C и влажности более 95%; запрещается оставлять двери шкафов открытыми; не разрешается оставлять без присмотра включенную машину или отдельные устройства; категорически запрещается менять предохранители под напряжением; запрещается снимать и вставлять разъемы соединительных кабелей при включенном напряжении; разрешается пользоваться паяльником напряжением не более 36 В. Пользоваться паяльником более высокого напряжения разрешается лишь при условии заземления корпуса паяльника.

При выполнении наладочных работ в распределительном щите следует надевать резиновые перчатки, а под ноги стелить резиновый коврик.

При эксплуатации вычислительных машин следует вести учет использования машинного времени.

11.5. Метрологическое обеспечение производства

Метрологическое обеспечение подготовка производства – это комплекс организационно-технических мероприятий, обеспечивающих определение требуемой точностью характеристик изделий технологических процессов и оборудования, необходимых в производстве изделий. Научной основой метрологического обеспечения является метрология - наука об измерениях, методах и средствах обеспечения их единства и способах достижения требуемой точности.

Метрологическое обеспечение подготовки производства осуществляется на основе широкого внедрения положений государственной системы обеспечения единства измерений (ГСИ).

Государственная система обеспечения единства измерений - это комплекс установленных стандартами взаимосвязанных правил, положений, требований, норм, определяющих организацию и методику проведения работ по оценке и обеспечению точности измерений.

Основными целями метрологического обеспечения являются: повышение качества продукции, эффективности управления производством и уровня автоматизации производственных процессов; обеспечение взаимозаменяемости деталей, узлов и агрегатов, создание необходимых условий для кооперирования производства и развития специализации; повышение эффективности научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, экспериментов и испытаний; обеспечение достоверного учета и повышение эффективности использования материальных ценностей и энергетических ресурсов; повышение эффективности мероприятий по профилактике, охране окружающей среды, оценке и рациональному использованию природных ресурсов; повышение уровня автоматизации управления, обеспечение высокого качества и надежности связи.

Выполняя поставленные цели, необходимо осуществлять решение следующих основных задач метрологического обеспечения на предприятии: проведение анализа состояния измерений на предприятии, разработка на его основе и осуществление мероприятий по совершенствованию метрологического обеспечения на предприятии, участие в разработке и выполнении заданий, предусмотренных программами метрологического обеспечения отрасли; установление рациональной номенклатуры измеряемых параметров и оптимальных норм точности измерений на предприятии; проведение работ по созданию и внедрению современных методик выполнения измерений и средств измерений, испытаний и контроля, установлению рациональной номенклатуры применяемых на предприятии средств измерений и средств поверки; внедрение государственных и отраслевых стандартов; проведение метрологической экспертизы проектов нормативно-технической, конструкторской и технологической документации; поверка метрологическая аттестация средств измерений, применяемых на предприятии; аттестация методик выполнения измерений; контроль за производством, состоянием, применением и ремонтом средств измерения и соблюдением метрологических правил, требований и норм на предприятии.

Решение задач метрологического обеспечения на предприятии осуществляют подразделения и службы предприятия под методическим руководством и при непосредственном участии в работах метрологической службы предприятия.

Одной из важнейших задач метрологического обеспечения является организация и порядок проведения поверки, ревизии и экспертизы средств измерений, т.е. метрологический надзор.

Метрологический надзор проводится за средствами измерений, выпускаемыми из производства и ремонта, поставляемыми по импорту и находящимися в обращении в стране.

Система метрологического надзора включает комплекс правил, положений и требований технического, экономического и правового характера, определяющих организацию и порядок проведения работ по поверке средств измерений, метрологической ревизии и метрологической экспертизе.

Метрологический надзор осуществляется в целях: обеспечения единства и достоверности измерений в стране; систематического совершенствования парка средств измерений, применяемых во всех отраслях народного хозяйства, путем внедрения новой измерительной техники, отвечающей требованиям научно-технического прогресса и повышения эффективности научных исследований и производства; поддержания средств измерений в постоянной готовности к выполнению измерений.

К эксплуатации допускаются средства измерений, признанные по результатам метрологического надзора пригодными к применению.

За надлежащее состояние и исправность средств измерений, правильность производимых измерений, организацию и качество ведомственного метрологического надзора ответственность несет руководитель предприятия. Формы метрологического надзора могут осуществляться путем проведения поверки средств измерений, метрологической ревизии и метрологической экспертизы.

Поверка средств измерений проводится для установления их пригодности к применению. Средства измерений должны подвергаться первичной, периодической, внеочередной и инспекционной поверке. Первичная поверка должна проводиться при выпуске средств измерений в обращение из производства и ремонта. Периодическая поверка должна проводиться при эксплуатации и хранении средств измерений через определенные межповерочные интервалы, установленные с расчетом обеспечения исправности средств измерений на период между поверками. Внеочередная поверка должна проводиться при эксплуатации (хранении) средств измерений вне зависимости от сроков периодической поверки: когда необходимо удостовериться в исправности средств измерений; при вводе в эксплуатацию средств измерений, поступающих по импорту; при проведении работ по корректированию межповерочных интервалов; при контроле результатов периодической поверки; когда средства измерений устанавливаются в качестве комплектующих изделий после истечения половины гарантийного срока на них, указанного поставщиком в сопроводительной документации; при повреждении доверительного клейма, пломбы и утрате документов, подтверждающих прохождение средствами измерений периодической поверки; при вводе в эксплуатацию после хранения, в течение которого не могла быть проведена периодическая поверка в связи с требованиями к консервации средств измерений.

Инспекционная поверка должна проводиться для выявления исправности средств измерений, выпускаемых из производства или ремонта и находящихся в обращении, при проведении метрологической ревизии на предприятиях, складах, базах снабжения и в торговых организациях.

Метрологическая ревизия проводится для определения соответствия средств измерений и применяемых методик измерений современным требованиям народного хозяйства и уровня метрологического обеспечения производства, а также проверки готовности средств измерений к выполнению измерений с нормированной. Метрологической ревизии должны подвергаться средства измерений предприятий, осуществляющих изготовление, ремонт, эксплуатацию, хранение и продажу средств измерений.

Метрологическая экспертиза проводится для экспертной оценки состояния средств измерений и правильность их поверки и применения.

Средства измерений не допускаются к применению, если при поверке, метрологической ревизии или метрологической экспертизе установлено, что они неисправны, в том числе имеют внешние повреждения или своевременно не поверены. Все средства измерений подлежат обязательной государственной или ведомственной поверке. К проведению поверки средств измерений допускаются лица, прошедшие специальное обучение и сдавшие экзамены в учебных заведениях Госстандарта. Разрешения на выполнение поверочных работ органам ведомственных метрологических служб должны выдаваться органами государственной метрологической службы и оформляться регистрационными удостоверениями.

При направлении средств измерений на поверку в органы государственной метрологической службы по их требованию должны представляться выпускные аттестаты (паспорта) или последние свидетельства о поверке и описания средств измерений.

Первичная поверка средств измерений, подлежащих обязательной государственной поверке, должна проводиться органами государственной метрологической службы на контрольно-поверочных пунктах, организуемых этими органами на приборостроительных и прибороремонтных предприятиях, которые для этой цели должны предоставлять отдельные помещения.

Первичная поверка средств измерений, подлежащих при выпуске в обращение ведомственной поверке, должна производиться: при выпуске из производства – предприятием-изготовителем; при выпуске из ремонта - метрологической службой предприятия, зарегистрированной государственной метрологической службы.

Периодическая поверка средств измерения, находящихся в эксплуатации и на хранении, должна проводиться в календарные сроки, установленные годовыми календарными графиками поверки или расписанием, определяемым органами государственной метрологической службы.

Годовые календарные графики проверки составляются предприятиями в виде перечней средств измерений с указанием периодичности и календарных сроков их поверки. Органы государственной метрологической службы должны безотказно принимать средства измерений, представляемые на поверку предприятиями.

Метрологическая служба предприятия должна иметь обменный и прокатный фонд средств измерений для нужд подразделений предприятия, вести их учет и организовывать работы по обмену и хранению.

11.6. Техника безопасности при эксплуатации электронных средств

Техникой безопасности называется комплекс организационных и технических мероприятий, направленных на предохранение работающих от производственного травматизма и вредных воздействий, вызываемых условиями работы. Каждый рабочий, связанный по условиям производства с работой должен иметь заключение врача о годности его к работе в указанных условиях. Медицинский осмотр определяет пригодность работника по состоянию здоровья к работам на электроустановках напряжением до 1000 В и выше. Поступившие на работу лица допускаются к работе только после прохождения вводного инструктажа по технике безопасности и производственного инструктажа непосредственно на рабочем месте.

Задачей вводного инструктажа является ознакомление с общими правилами техники безопасности с целью заострить внимание поступивших на работу лиц на выполнении этих правил во избежание несчастных случаев. После вводного инструктажа по технике безопасности рабочий проходит производственный инструктаж непосредственно на рабочем месте. Инструктаж по рабочему месту проводит должностное лицо, под руководством которого работает инструктируемый, в объема обязательных инструкции по рабочему месту. Инструктаж сопровождается показом правильных и безопасных приемов и методов работы, которые и предотвращают несчастные случаи. Проведение инструктажа отмечают в журнале.

При работе с электрическими устройствами и системами автоматизации необходимо проверять надежность заземления корпусов двигателей, панелей, щитов, трансформаторов и защитных труб электрических проводов. Нельзя ремонтировать электрооборудование, приборы, регулирующие устройства и элементы пуско-регулирующей аппаратуры без отключения их от напряжения. Если нельзя снять напряжение, следует пользоваться монтерским инструментом с изолированными ручками, работать в резиновых перчатках, стоя на резиновом коврике. Особые меры предосторожности необходимо принимать при работе в сырых помещениях с металлическими полами вблизи металлических конструкций, щитов, трубных проводов и т.п.

Необходимо иметь в виду, что в таких помещениях разрешается пользоваться электрически переносным инструментом на напряжение не более 12 В.

К защитным средствам относятся: изолирующие, переносные указатели тока и напряжения, переносные защитные заземления, ограждения, предупредительные плакаты и другие. Изолирующие средства служат для защиты персонала от действия электрического тока путем изоляции человека от токоведущих частей или от проводящего основания. К изолирующим средствам относятся диэлектрические перчатки и боты, коврики, подставки и др.

Переносные указатели тока и напряжения предназначены для измерения тока и проверки отсутствия напряжения. Переносные защитные заземления представляют собой самые надежные защитные средства. Они предотвращают поражение электрическим током работающих людей на отключенных токоведущих частях при ошибочной подаче на них напряжения.

Для указания места работы, предупреждения об опасности, запрещения служат плакаты. В зависимости от назначения они могут быть предупреждающие, запрещающие, разрешающие и напоминающие.

Переносные ограждения служат для ограждения доступных для прикосновения частей, находящихся под напряжением и расположенных вблизи места работы.

Все защитные средства периодически подвергаются испытаниям и хранят в специально отведенных местах.

ГЛАВА 12. Основы теории расчета необходимого комплекта запасных элементов для ЭиВС

12.1. Общие положения о комплектации ЭиВС запасными элементами. Основные определения

Одним из основных условий ремонтпригодности аппаратуры является обеспечение ее необходимым комплектом запасных элементов (ЗИП), используемых при отказах аппаратуры. Комплект ЗИПа должен: содержать все необходимые в процессе эксплуатации элементы. Иногда отсутствие необходимых элементов в комплектах ЗИПа намного увеличивает время восстановления аппаратуры. Однако создание чрезмерных размеров ЗИПа экономически нецелесообразно, так как при этом происходит замораживание огромных средств и зачастую дефицитных элементов.

Следовательно, правильное комплектование ЗИПом, оптимизация его по стоимости являются важной проблемой при решении вопросов ремонтпригодности электронной аппаратуры,

ЗИПы разделяются на комплекты; одиночный и групповой.

Одиночный комплект ЗИПа придается определенному изделию и предназначен для обеспечения только данного изделия.

Групповой комплект ЗИПа придается группе изделий и предназначается для пополнения одиночных комплектов ЗИПа и обеспечения изделий теми элементами, которых нет в одиночном комплекте ЗИПа. При эксплуатации аппаратуры, комплекты ЗИПа пополняются - одиночный за счет группового, а групповой за счет элементов, хранящихся на специальном складе или имеющихся в соответствующем органе снабжения.

По характеру использования элементы аппаратуры, о чем уже говорилось, можно дифференцировать на восстанавливаемые (блоки, узлы, модули и т. п.) и невосстанавливаемые (интегральные схемы, транзисторы, резисторы, конденсаторы и т.п.).

К невосстанавливаемым относятся такие элементы аппаратуры, которые после появления в них отказа нецелесообразно восстанавливать.

Восстанавливаемые элементы аппаратуры ремонтируют либо на месте эксплуатации силами обслуживающего персонала, либо в специальных ремонтных органах.

Номенклатура элементов ЗИПа зависит от методики ремонта аппаратуры. Как известно, при использовании агрегатного метода ремонта в составе ЗИПа должны находиться съемные агрегаты (блоки модули). Если ремонт съемных восстанавливаемых элементов производится на месте эксплуатации, то ЗИП еще дополнительно должен содержать невосстанавливаемые элементы аппаратуры.

Независимо от методики ремонта аппаратуры могут быть осуществлены три схемы обеспечения ее запасными элементами:

1) нормальная схема обеспечения аппаратуры ЗИПом, когда имеется одиночный и групповой комплекты запасных элементов;

2) одиночная схема обеспечения аппаратуры ЗИПом, когда отсутствует групповой комплект запасных элементов;

3) групповая схема обеспечения аппаратуры ЗИПом, когда отсутствуют одиночные комплекты запасных элементов.

Последние две схемы являются частными случаями нормальной схемы.

При отказе аппаратуры ее неисправный элемент заменяют исправным из состава ЗИПа. Поэтому в ЗИПе некоторое время отсутствует этот элемент. Его необходимо поставлять из соответствующего органа снабжения (группового ЗИПа, склада, завода и т. п.). Условимся время отсутствия необходимого элемента в комплекте запасных элементов называть временем восстановления элемента ЗИПа. Оно состоит из времени доставки элемента, времени замены его на складе при ремонте и времени ожидания замены или ремонта.

ЗИП необходим как для текущего ремонта, так и для профилактического. Ту часть ЗИПа, которая необходима для проведения профилактического ремонта, принято называть плановым ЗИПом, а ту часть, которая необходима для проведения текущего ремонта ЗИПом. Практически подавляющая часть комплекта запасных элементов предназначена для текущего ремонта.

12.2. Критерии оценки достаточности комплекта запасных элементов

Было показано, что среднее время восстановления аппаратуры можно представить в виде трех компонент:

$$T_s = T_a + T_{ad} + T_n, \quad (12.1)$$

где T_a - среднее время активного ремонта; T_{ad} - среднее время вынужденного простоя аппаратуры при текущем ремонте из-за административных факторов; T_n - среднее время вынужденного простоя аппаратуры из-за отсутствия в ЗИПе необходимых элементов (время снабжения).

Выражение (12.1) удобнее представить в виде

$$T_s = T_s^I + T_n \quad (12.2)$$

$$T_s^I = T_a + T_{ad} \quad (12.3)$$

T_s^I - среднее время восстановления аппаратуры при неограниченном (идеальном) комплекте ЗИПа, т. е. когда отсутствуют задержки в снабжении.

В свою очередь, среднее время восстановления аппаратуры можно выразить через средние времена восстановления аппаратуры при отказе определенных элементов выражением

$$T_s = \sum_{i=1}^{\infty} t_{a_i} q_i, \quad (12.4)$$

где t_{oi} - среднее время восстановления аппаратуры при отказе i -го элемента; g_i - вероятность отказа аппаратуры из-за i -го элемента при достоверном факте отказа аппаратуры; ω - количество элементов в аппаратуре.

T_{oi} можно также представить в виде двух компонент:

$$t_{oi} = t'_{oi} + t_{ni}, \quad (12.5)$$

где t'_{oi} и t_{ni} - компоненты, соответствующие выражению (12.2) только для i -го элемента.

Не нарушая общности в выражении (12.4), можно перейти от конкретного элемента к группе однотипных элементов путем замены t_{oi} на t'_{oi} , q_i на q'_j и ω на k , которые соответствуют значениям для группы элементов.

С учетом изложенного получаем уравнение из которого следует

$$T_o = T'_o + T_n = \sum_{i=1}^{\omega} t'_{oi} q_i + \sum_{i=1}^k t_{nj} q'_j \quad (12.6)$$

Из которого следует

$$T_n = \sum_{i=1}^k t_{nj} q'_j, \quad (12.7)$$

где t_{nj} - среднее время вынужденного простоя, аппаратуры при текущем ремонте из-за элементов j -й группы; q'_j - вероятность отказа аппаратуры из-за элементов j -й группы при отказе аппаратуры вообще, т. е. условная вероятность отказа аппаратуры из-за элементов j -й группы; k - количество групп элементов в аппаратуре (номенклатура элементов).

Величина T_n может быть принята за критерий достаточности, ЗИПа. Однако ЗИП непосредственно влияет на коэффициент готовности аппаратуры, который задается в техническом задании на аппаратуру, что обуславливает необходимость связать критерий достаточности ЗИПа с коэффициентом готовности аппаратуры, который задается в техническом задании на аппаратуру, что обуславливает необходимость связать критерий достаточности ЗИПа с коэффициентом аппаратуры.

Установившееся значение коэффициента готовности можно записать так:

$$K_r = \frac{T}{T + T'_o + T_n} \quad (12.8)$$

После элементарных преобразований выражение (12.8) будет иметь вид

$$K_r = \frac{T}{T + T'_o} \cdot \frac{T}{T + T'_o + T_n} = K'_r K_s, \quad (12.9)$$

где коэффициент готовности аппаратуры при неограниченном комплекте ЗИПа

$$K'_r = \frac{T}{T + T'_o}; \quad (12.10)$$

$$K_s = \frac{T + T'_o}{T + T'_o + T_n}, \quad (12.11)$$

K_s - коэффициент обеспеченности аппаратуры запасными элементами.

Из выражения (12.9) следует, что коэффициент обеспеченности аппаратуры ЗИПом существенно влияет на коэффициент готовности аппаратуры и показывает степень уменьшения его за счет ЗИПа.

Таким образом, если среднее время восстановления аппаратуры и коэффициент готовности аппаратуры являются показателями ремонтпригодности, то среднее время простоя аппаратуры из-за ЗИПа и коэффициент обеспеченности аппаратуры ЗИПом являются критериями обеспеченности аппаратуры запасными элементами.

12.3. Математическая модель процесса обеспечения аппаратуры запасными элементами одного типоминиала (группы)

Прежде, чем приступить к описанию процесса обеспечения аппаратуры запасными элементами всех типоминиалов, рассмотрим процесс обеспечения элементами одним типоминиалом. В дальнейшем для краткости вместо типоминиала будет использован термин тип элемента.

Процесс обеспечения аппаратуры запасными элементами имеет характер массового обслуживания, поэтому можно использовать математический аппарат теории массового обслуживания и описать его следующей математической моделью.

1. Обслуживающей системой является система, удовлетворяющая требованиям электронной аппаратуры по замене отказавшего элемента на исправный из комплекта ЗИПа.

2. Поток требований, состоит из трех потоков отказов:

а) потока отказов элементов аппаратуры, когда она находится во включенном состоянии (под током);

б) потока отказов элементов аппаратуры, когда она находится в выключенном состоянии;

в) потока отказов элементов комплектов ЗИПа.

3. Аппаратами обслуживания являются элементы комплекта ЗИПа.

4. Время обслуживания представляет собой время восстановления элемента ЗИПа.

5. При появлении отказавшего элемента в аппаратуре и отсутствии типового в комплекте ЗИПа - требование на обслуживание аппаратуры получает отказ.

6. Критерием оценки системы является вероятность отказа в требовании аппаратуры на замену отказавшего элемента из состава ЗИПа при наличии в нем n -элементов.

Сформированная математическая модель является моделью системы массового обслуживания с потерями при неограниченном количестве требований и ограниченном числе обслуживающих аппаратов.

Для полноты описания математической модели необходимо дать математическую характеристику потоков требований и времени обслуживания.

Опыт показывает, что для внезапных отказов наиболее справедлив экспоненциальный закон распределения длительности безотказной работы элементов электронной аппаратуры [8, 11, 13]. Этот же закон справедлив и при хранении элементов.

Расчет требуемого комплекта

Для определения требуемого комплекта ЗИПа необходимо знать допустимое среднее время простоя T_n аппаратуры из-за отсутствия в ЗИПе необходимых элементов или коэффициент обеспеченности аппаратуры ЗИПом K_3 и распределение среднего времени T_n по группам элементов.

$$T_n = \frac{1-K_3}{K_3}(T + T'_e) = \sum_{j=1}^k t_{nj}q_j = \sum_{j=1}^k T_{nj} \quad (12.12)$$

Из выражения (12.12) следует, что если задан коэффициент обеспеченности аппаратуры ЗИПом, то можно определить только левую часть уравнения. Для решения уравнения (12.12) необходимо еще задать порядок (закон) распределения общего времени T_n по группам элементов.

Из всех возможных законов распределения T_n по группам элементов рассмотрим четыре.

1. $t_{nj} = t_n = \text{const}$ (при $j = 1, 2, \dots, k$) (12.13)

Физически это означает, что допускается равное среднее время простоя аппаратуры для всех типов элементов при условии их равнопрочности.

В этом случае $T_n = \sum_{j=1}^k t_{nj}q_j = t_n \sum_{j=1}^k q_j = t_n$ ($j=1, 2, \dots, k$), т. е. допустимое среднее время простоя аппаратуры из-за отсутствия необходимых элементов в ЗИПах равно среднему времени простоя из-за ЗИПа при отказе аппаратуры из-за любого типа элементов.

2. $t_{nj}q_j = \text{const}$ (при $j = 1, 2, \dots, k$) (12.14)

Физически это означает, что допускается равный ущерб (простой) из-за всех типов элементов, наносимый готовности аппаратуры.

В этом случае

$$T_n = kt_nq_j; \quad t_{nj} = \frac{T_n}{kq_j} \quad (\text{при } j=1, 2, 3, \dots, k) \quad (12.15)$$

3. Допускается распределение T_n пропорционально стоимости запасного элемента.

Обозначим стоимость элемента j -й группы через C_j тогда коэффициент стоимости элемента, определяется по выражению:

$$\eta = \frac{C_j}{\sum_{j=1}^k C_j} \quad (12.16)$$

Из выражения (12.16) следует равенство

$$\sum_{j=1}^k \eta_j = 1 \quad (12.17)$$

Перемножим соответствующие части равенства (12.12) и (12.17)

$$T_n \sum_{j=1}^k \eta_j = \sum_{j=1}^k t_{nj} q_j \quad (12.18)$$

Приравнивая в уравнении (12.18) каждый член левой части соответствующему члену правой части, получим

$$t_{nj} = T_n \eta_j / q_j \quad (12.19)$$

Уравнение (12.19) при допущении равенства стоимости всех элементов превращается в выражение (12.15), а при допущении и равной надежности в выражение (12.13), т. е. выражения (12.13) и (12.15) являются частными случаями уравнения (12.19).

4. Допустимое время простоя аппаратуры из-за отсутствия элементов i -й группы определяется из условия оптимальности комплекта ЗИПа по какому-нибудь дополнительному критерию (стоимости, объема, веса и т. д.).

Исходными данными для расчета являются перечисленные ранее данные, но вместо n_{1j} и n_{2j} задается коэффициент обеспеченности аппаратуры ЗИПом.

Выходными данными расчета являются количество элементов в одиночном и групповом комплектах ЗИПа (n_{1j} и n_{2j}) и стоимость комплекта ЗИПа, приходящаяся на одно изделие C .

12.4. Методы определения норм комплектования запасными частями ЭиВС

Задача расчета запасных частей к изделию состоит в определении номенклатуры и количества запасных частей каждого наименования, обеспечивающих с заданной вероятностью поддержание работ способности данного изделия в течение всего срока службы с выработкой всего назначенного ресурса.

Вероятность обеспечения запасными частями оговаривается заказчиком в техническом задании на разработку изделия и согласовывается с разработчиком.

Расчет запасных частей состоит из двух этапов:

- определение номенклатуры запасных частей;
- расчет количества запасных частей.

Детали, сборочные единицы, комплектующее оборудование (в дальнейшем – элементы), составляющие изделие в зависимости от вида возникновения отказов и ремонтпригодности разделяются на три группы по табл.12.1.

Таблица 12.1

Группа	Ремонтпригодность элементов	Виды отказов элементов
Первая	Неремонтируемые	Внезапные
Вторая	Ремонтируемые	
Третья	Неремонтируемые	Постепенные

Первая и вторая группы включают в себя элементы, срок службы и ресурс которых значительно превышает заданную величину ресурса и срок службы изделия.

К первой группе относятся все радиоэлектронные и электротехнические элементы массового применения, а также элементы, ремонт которых в условиях эксплуатации не предусмотрен.

Ко второй группе относятся сменные элементы, которые подлежат ремонту силами обслуживающего персонала.

При этом вместо ремонтируемого элемента устанавливается исправленный из числа запасных, а отказавший поступает в ремонт.

При расчете количества запасных частей первой и второй групп элементов принимаются следующие допущения:

- отказы элементов являются событиями случайными и независимыми;
- производственные отказы устранены до этапа эксплуатации;
- износные явления элементов в пределах требуемых величин ресурса отсутствуют или их влияние незначительно;
- распределение отказов элементов в течение нормативной наработки (заданной продолжительности непрерывной работы) подчинено экспоненциальному закону и вероятность безотказной работы описывается уравнением:

$$P(t) = e^{-\lambda t}; \quad (12.20)$$

- номенклатура и нормы запасных частей должны удовлетворять условию:

$$PP(N) \geq P(N)_{зад}. \quad (12.21)$$

К третьей группе относятся изделия (элементы), имеющие назначенный ресурс (срок службы), определяемый износом или старением.

Перечень условных обозначений, принятых в настоящем разделе, приведен в приложении 1.

12.5. Исходные данные для определения номенклатуры и потребности необходимых запасных частей

Исходными данными для определения потребности в запасных частях служат:

- а) сведения о составе изделия (функциональная схема, перечень элементов, их типы и количества);
- б) данные, определяющие условия эксплуатации изделия и его элементов (температура окружающей среды, коэффициент нагрузки, коэффициент использования элементов в изделии);
- в) данные о надежности комплектующего оборудования по техническим условиям на поставку или справочным материалам;
- г) требования технического задания по курсу, сроку службы, вероятности безотказной работы и среднему времени восстановления изделия;

д) данные по надежности аналогичных изделий.

Порядок определения номенклатуры запасных частей установлен следующий:

а) изделие разделить на отдельные конструктивно- самостоятельные сборочные единицы;

б) сборочные единицы изделия разделить на составные элементы и внести их в ведомость расчета запасных частей (приложения 2);

в) произвести расчет ресурса каждого элемента с учетом условий эксплуатации и особенностей их использования в составе изделия, показатели занести в таблицу приложения 2.

Примечание. Сборочные единицы, поставляемые по техническим условиям или другой поставочной документации, в которых оговорены показатели надежности, деление на составные элементы не подлежат.

Графы ведомости расчета запасных частей согласно приложения 2 заполнять:

графу 1 – наименованием и типом сборочной единицы и составляющих ее элементов;

графу 2 – номинальными величинами по ТУ на поставку;

графу 3 – обозначением элемента на поставку (ГОСТ, ОСТ, ТУ, чертеж);

графу 4 – количеством элементов в изделии;

графу 5 – номером группы элемента по виду отказа и ремонтпригодности;

графу 6 – ресурсом суммарным;

графу 7 – нормативной наработкой (временем непрерывной работы);

графу 8 – интенсивность отказов по ГОСТ, ТУ и т.п.;

графу 9 – величиной коэффициента нагрузки, соответствующей оговоренному техническими условиями на поставку ресурсу. При отсутствии указания в технических условиях, для какой величины коэффициента нагрузки приводится ресурс, коэффициент нагрузки принять равным 1;

графу 10 – температурой окружающей среды номинальной, соответствующей приведенному в технических условиях ресурсу. При отсутствии в технических условиях номинальной величины температуры, в графу 10 внести максимально-допустимую температуру окружающей элемент среды;

графу 11 – максимально – допустимой температурой окружающей элемент среды;

графу 12 – допустимой долей времени (в процентах) работы элемента при максимально – допустимой температуре окружающей среды;

графу 13 – допустимым по техническим условиям количеством циклов срабатываний (переключений, включений и т.п.) за весь период эксплуатации;

графу 14 – расчетным коэффициентом нагрузки, взятым из рабочих режимов;

графы 15 и 16 – соответственно, номинальной и максимально-возможной температурами окружающей среды;

графу 17 – расчетной долей времени работы при максимально-возможной температуре окружающей среды;

графу 18 – предполагаемым числом циклов срабатываний в час, определенным из режимов работы или по опыту эксплуатации;

графу 19 – коэффициентом использования элемента в изделии, который представляет собой отношение фактического времени работы элемента ко времени работы изделия.

Коэффициент использования определяется разработчиком по функциональной схеме изделия и учитывается, когда его величина меньше 0,75.

Пример: элемент подключается при работе изделия на 24 минуты в течение одного часа, тогда:

$$K_H = \frac{24}{60} = 0,4;$$

графу 20 – значением поправочного коэффициента α_i , определяемым из графика зависимости (приложение 5, рис. 5.1):

$$\alpha_i = \frac{\lambda_{p,i}}{\lambda_{o,i}} = f(K_{н.о.}; \tau_{o.н.}); \quad (12.22)$$

для значений коэффициента нагрузки и температуры окружающей среды (графы 9 и 10);

графу 21 – значением поправочного коэффициента α_2 , учитывающего работу элемента при максимально – возможной и рабочей температуре окружающей его среды:

$$\alpha_2 = \alpha'_2 \frac{L_{cp}}{100} + \alpha''_2 \frac{100 - L_{cp}}{100}, \quad (12.23)$$

где

$$\alpha'_2 = f(K_{н.р.}; \tau_{p,max})$$

$$\alpha''_2 = f(K_{н.р.}; \tau_p)$$

Значения $K_{н.р.}$, τ_p , $\tau_{p,max}$ определяются по графикам (приложение 5)

Пример: $L_{cp} = 20 \%$; $K_{н.р.} = 0,4$; $\tau_{p,max} = 60 \text{ }^\circ\text{C}$; $K_{н.р.} = 0,8$; $\tau_p = 30 \text{ }^\circ\text{C}$;

$$\alpha'_2 = f(0,4; 60 \text{ }^\circ\text{C}); \alpha''_2 = f(0,8; 30 \text{ }^\circ\text{C}); \alpha_2 = \alpha'_2 \frac{L_{cp}}{100} + \alpha''_2 \frac{100 - L_{cp}}{100},$$

$$\alpha_2 = \alpha'_2 \cdot 0,2 + \alpha''_2 \cdot 0,8.$$

По данным граф 6-21 произвести расчет ожидаемых значений ресурса и интенсивности отказов каждого элемента, полученные значения внести соответственно в графы 22, 23 и 26 ведомости расчета запасных частей.

Интенсивность отказов элементов в реальных условиях эксплуатации (в зависимости от температуры окружающей среды и нагрузки) определять по формуле:

$$\lambda_p = \lambda_o \frac{\alpha_2}{\alpha_i} \cdot 1/4. \quad (12.24)$$

Коэффициенты α_2 и α_i определять по графикам зависимости $\alpha = f(K_H, \tau)$ и формуле 4.

Для сопротивлений типа МЛТ интенсивность отказов определять по формуле:

$$\lambda_p = \lambda_o \alpha \frac{\alpha_2}{\alpha_1}, 1/4 \quad (12.25)$$

Коэффициент α определять по графику $\alpha = f(K_H)$ (приложение 5).

Для переключающих устройств и релейно-контактных элементов интенсивность отказов определять по формуле:

$$\lambda_p = \lambda_{\text{оом}} + \lambda_o \alpha \frac{\alpha_2}{\alpha_1}, 1/4, \quad (12.26)$$

где $\lambda_{\text{оом}}$ – определять по графику $\lambda_{\text{оом}} = f(z_p)$ (приложение 5);

α_2 и α_1 – определять по черт. (приложение 5).

Получение значения ресурсов и интенсивности отказов каждого элемента проанализировать на предмет удовлетворения требований по ресурсу и безотказности к изделию.

Элементы, обладающие ресурсом и безопасностью, удовлетворяющие условиям

$$T_{p,i} \geq T_{p,\text{зад}}; \quad (12.27)$$

$$g(t) \leq 0,001 \quad (12.28)$$

из дальнейшего рассмотрения исключить и в графах 24, 25 и 27-30 сделать прочерк.

Элементы, не удовлетворяющие условиям (12.27) и (12.28), составляют номенклатуру запасных частей.

При расчете интенсивностей отказов и ресурса по формулам (12.23), (12.24) для элементов, графики зависимости которых не приведены в приложении 5 настоящего стандарта, использовать справочные материалы.

12.6. Расчет ресурса элементов для заданных условий эксплуатации

Порядок расчета ресурса элементов проводится в следующей последовательности.

Показатели надежности, установленные техническими условиями на поставку элементов (ресурс и срок службы), определены, исходя из работы при номинальных значениях рабочей нагрузки и параметров окружающей среды.

При эксплуатации элементов в условиях, отличающихся от установленных техническими условиями на поставку, в зависимости от функционального назначения элемента в изделии (сборочной единице), его нагрузки и эксплуатационных параметров окружающей среды, необходимо произвести перерасчет ресурса для заданных условий эксплуатации, в соответствии с методическими указаниями, изложенными в настоящем разделе.

Расчет ресурса постоянных резисторов, конденсаторов и моточных изделий, полупроводниковых приборов и интегральных схем.

Расчет ресурса постоянных резисторов, конденсаторов, полупроводниковых приборов, моточных изделий и установочных элементов производить по формуле:

$$T_{p,p} = T_{p,o} \cdot \frac{\alpha_1}{\alpha_2}, \text{ ч} \quad (12.29)$$

Коэффициенты α_2 и α_1 определять по графикам зависимости $\alpha = f(K_H, \tau)$ (приложение 5) и формуле 12.23.

В случае, когда ожидаемый ресурс, определенный по формуле (12.25) больше требуемого, полученное значение не приводить, а указать, что

$$T_{p,p} > T_{p, \text{требуемого}}. \quad (12.30)$$

Расчет ресурса элементов индикации производить по формуле:

$$T_{p,p} = T_{p,o} \cdot \frac{1}{M} \left(\frac{U_{TY}}{U_p} \right)^{12}. \quad (12.31)$$

При определении ожидаемого ресурса элементов индикации рекомендуется использовать график зависимости коэффициента $M = \frac{\lambda_o}{\lambda_o}$ от числа включений их в час (приложение 5)

Расчет ресурса переменных резисторов

В технических условиях на переменные резисторы приводятся два значения ресурса;

– по времени работы (в часах);

– по количеству поворотов оси из одного крайнего положения в другое.

Указанное в технических условиях допустимое количество поворотов оси переменного резистора связано с определенной степенью износа и пересчету не подлежит.

Величину ресурсов, с учетом фактической нагрузки и температуры окружающей среды, рассчитать по формуле (12.29):

$$T'_{p,p} = T_{p,o} \cdot \frac{\alpha_1}{\alpha_2}. \quad (12.32)$$

Коэффициент нагрузки, необходимый для определения величины коэффициента α_2 , определить по формуле:

$$K_{n,p} = \frac{J_p^2 \cdot \lambda_n}{P_n}. \quad (12.33)$$

Величину ресурса с учетом износоустойчивости, определить, исходя из допустимого количества поворотов оси по техническим условиям и расчетного количества поворотов оси в час при эксплуатации, по формуле:

$$T'_{p,p} = \frac{z_o}{z_p}, \text{ ч} \quad (12.34)$$

Полученные значения ресурса сравнивают и за ресурс данного резистора принимают меньшее из этих значений, т.е.

$$\begin{aligned} T_{p.p} &= T'_{p.p.} \text{ если } T'_{p.p.} < T''_{p.p.}; \\ T_{p.p} &= T''_{p.p.} \text{ если } T'_{p.p.} > T''_{p.p.} \end{aligned} \quad (12.35)$$

Для переменных резисторов, используемых в качестве установочных (положение которых фиксируется при первоначальной настройке аппаратуры и в дальнейшем не изменяется), ресурс рассчитывается по формуле (12.29) без учета износоустойчивости движущихся частей.

При известном рабочем положении движка резистора коэффициент нагрузки определять по формуле (12.30). Если положение движка приблизительно известно, то коэффициент нагрузки определять по формуле:

$$K_{н.р.} = \frac{P_p R_n}{P_n R_p}. \quad (12.36)$$

Расчет ресурса переключающих устройств исходя из значения ресурса, приведенного в технических условиях и графиков зависимости $\alpha=f(K_{и}, t)$ по формуле:

$$T'_{p.p.} = T_{p.o.} \frac{\alpha_i}{\alpha_2}. \quad (12.37)$$

Определить ресурс устройства, исходя из допустимого количества переключений в час и коэффициента нагрузки по току, по формуле:

$$T'_{p.p.} = \frac{z_0}{z_p \cdot K_{н.р.}}. \quad (12.38)$$

Коэффициент нагрузки по току менее 0,1 принимать не рекомендуется.

Меньшее из двух полученных значений принятых за величину ресурса (в часах) переключающего устройства для данных условий эксплуатации.

Расчет ресурса разъемов производить по формуле:

$$T_{p.p.} = T_{p.o.} \frac{\alpha_i \cdot z_0}{\alpha_2 \cdot z_p}. \quad (12.39)$$

где α_2 и α_i определяются по формулам (12.22) и (12.23), при значениях коэффициента нагрузки на контакт и температуры окружающей среды, оговоренных в технических условиях, и при фактических значениях в условиях эксплуатации.

12.7. Расчет количества запасных частей

Определить необходимую вероятность обеспечения запасными частями каждой группы элементов по виду отказов из формулы:

$$P(N)_j = P(N)_1 = P(N)_2 = P(N)_3 = \sqrt[3]{P(N)_{\text{зад}}}. \quad (12.40)$$

По каждой группе определить необходимую вероятность обеспечения запасными элементами, исходя из количества наименований элементов данной группы, включенных в номенклатуру запасных частей:

$$P(N)_i = \sqrt[n_i]{P(N)_j}, \quad (12.41)$$

где i – номер типа элемента в группе, изделии;

j – номер группы элементов по виду отказов ($j=1+3$). Полученные значения занести в заголовки ведомости (приложение 2).

Расчет количества запасных элементов первой группы

Требуемое количество запасных элементов рассчитать в следующем порядке:

а) определить среднее ожидаемое количество отказов рабочих элементов каждого наименования за расчетное время, равное назначенному ресурсу, по формуле:

$$m_{o.i.} = \lambda_{p.i.} \cdot T_p \cdot N_p, \quad (12.42)$$

б) исходя из полученных значений $P(N)_i$ и $m_{o.i.}$ определить необходимое количество запасных элементов каждого наименования по соотношению:

$$P(N)_{o.i.} = e^{-m_{o.i.}} \sum_{i=0}^{N_{o.i.}} \frac{(m_{o.i.})^i}{i!} \geq P(N)_i, \quad (12.43)$$

для времени, равного назначенному ресурсу.

Задача расчета состоит в определении такого количества запасных элементов $N_{o.i.}$, при котором значение вероятности обеспечения запасными элементами $P(N)_{o.i.}$ будет равно или больше заданного значения $P(N)_i$.

Расчет количества запасных элементов необходимо выполнять по монограмме зависимости $N_{o.i.}$ от $P(N)_{o.i.}$ и $m_{o.i.}$ (рис. 12.1), построенной при помощи распределения Пуассона, позволяющему определить вероятность появления, одного, двух и т.д. отказов за принятый промежуток времени при известной интенсивности отказов.

Полученные количества запасных элементов внести в графу 28 ведомости (приложение 2).

Расчет количества запасных элементов второй группы

Общее количество рабочих и запасных элементов каждого типа в изделии во время эксплуатации остается постоянным и равно:

$$N_{o.i.} = N_{p.i.} + N_{z.i.} \quad (12.44)$$

Расчет заключается в определении такого количества запасных элементов, при котором вероятность изделия будет:

$$PP(N), \geq P(N); \quad (12.45)$$

т.е. в комплекте запасных частей в любой момент времени будет находиться не менее одного запасного элемента.

Исходными данными для расчета количества запасных сменных элементов служат:

T_{oi} – средняя наработка элемента i – того типа между отказами;

$N_{p,i}$ – количество рабочих элементов i – того типа в изделии;

$P(N)_2$ – требуемая вероятность обеспечения запасными элементами;

n – число ремонтных мест.

При расчете количества запасных сменных элементов наличие ресурса изделия не учитывается, т.к. процесс: работа – отказ – ремонт – работа может продолжаться неограниченно во времени.

Выполнение задачи по расчету количества запасных сменных элементов обеспечивается при соблюдении отношения:

$$\frac{T_0 \cdot N_p}{T_0 \cdot n_0} \leq 1, \quad (12.46)$$

т.е. поток отказов сменных элементов в единицу времени должен быть меньше интенсивности восстановления.

Для упрощения расчета в стандарте приведены монограммы, для учебных целей значения можно рассчитывать по графику рисунок X для значений $n_0 = 1$ и $n_0 = 2$, которые представляют возможность (по отношению потока отказов к интенсивности восстановления и заданной вероятности обеспечения запасными частями) определить количество запасных сменных элементов.

Определение количества запасных элементов и деталей, необходимых для проведения восстановительных работ в течение данного периода эксплуатации с требуемой гарантированной вероятностью того, что полученного количества достаточно на указанный период эксплуатации, производится в следующей последовательности: по рассматриваемой группе приборов, определяется количество однотипных элементов-деталей (N); по справочникам отыскивается значение интенсивности отказов элементов данной группы (λ); вычисляется среднее значение количества запасных элементов в приборе по выражению,

$$N_{cp} = N \cdot \lambda \cdot t, \quad (12.47)$$

где t – период времени эксплуатации, принимаемый, равным одному году, в часах.

По графику рис. 12.1 определяется гарантированное число элементов или деталей ($N_{ГАП}$), являющееся функцией N_{cp} и гарантийной вероятности α . Значение α принимают равным 0,9-0,95. Полученное число $N_{ГАП}$ и есть количество запасных

элементов данного типа, которые следует иметь на предприятии для обслуживания и ремонта приборов, которые эксплуатируются на предприятии.

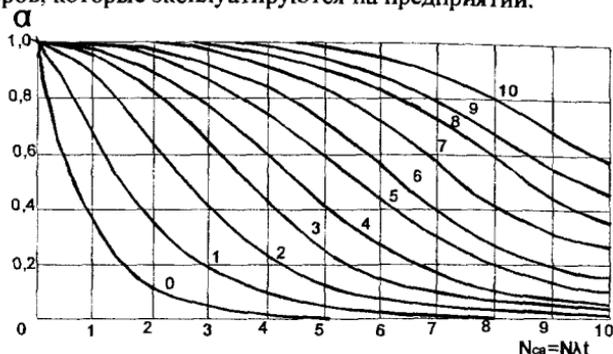


Рис. 12.1. График определения числа запасных элементов и деталей.

Количество запасных сменных элементов каждого наименования определить для расчетного времени работы изделия (назначенного ресурса) и внести в графу 28 ведомости (приложение 2).

Расчет количества запасных элементов третьей группы характеризуемых преобладанием износовых отказов, следует различать два характерных случая:

а) долговечность элемента больше требуемого ресурса изделия

$$M_0 > T_p; \quad (12.48)$$

б) долговечность элемента меньше требуемого ресурса изделия:

$$M_0 < T_p; \quad (12.49)$$

Расчет количества запасных элементов $M_0 < T_p$ выполнять в следующем порядке:

а) определить количество запасных элементов для выполнения профилактических замен:

$$N_{np} = \left(\frac{T_p}{M_0} - 1 \right) N_p. \quad (12.50)$$

При отсутствии значения математического ожидания безотказной работы вместо M_0 принять расчетное значение ресурса (графа 22 или 23 ведомости – приложение 2);

б) определить ожидаемое количество случайных отказов по формуле:

$$m_{o.i} = \lambda_{p.i} \cdot M_0 (N_p + N_{np}). \quad (12.51)$$

в) по значениям $m_{o.i}$ и $P(N)_i$ по рис. 12.1 определить требуемое количество запасных элементов для устранения случайных отказов;

г) суммарное количество запасных элементов, требуемое для проведения профилактических замен и устранения случайных отказов, определенное для расчетного времени работы (равного назначенному ресурсу) внести в графу 30 ведомости (приложение 2).

Для элементов, долговечность которых определяется числом срабатываний (включений, переключений, сочленений и т.п.) количество запасных элементов для выполнения профилактических замен определить по формуле:

$$N_{i,d} = \left(\frac{T_p}{T_{p,p}} - 1 \right) N_p, \quad (12.52)$$

где $T_{p,p}$ определяется по формуле (12.38).

ПРИНЯТЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

- J_n – номинальное значение тока нагрузки, А;
 J_p – расчетное значение тока нагрузки, А;
 K_δ – коэффициент безопасности;
 K_u – коэффициент использования;
 K_n – коэффициент нагрузки ($K_{н.о.}$ – номинальный, $K_{н.р.}$ – расчетный);
 L_0 – доля времени работы элемента при допустимой по ТУ температуре (L_{cp} – то же, но при температуре $\tau_{p,max}$), в %;
 m_0 – ожидаемое количество отказов элемента, шт.;
 M – коэффициент, учитывающий число включений в час;
 M_0 – математическое ожидание наработки элемента до первого отказа, ч;
 n_0 – количество мест, шт.;
 n_1 – количество групп элементов по виду отказа, шт.;
 n_2 – количество типов элементов данной группы, включенных в номенклатуру запасных частей, шт.;
 N_0 – общее количество рабочих и запасных элементов данного типа в изделии, шт.;
 N_z – количество запасных элементов данного типа, шт.;
 N_{np} – количество запасных элементов данного типа для выполнения профилактических замен, шт.;
 N_p – количество рабочих элементов данного типа в изделии, шт.;
 P_n – мощность номинальная, Вт;
 P_p – мощность рассеяния расчетная, Вт;
 $P(N)$ – вероятность обеспечения изделия запасными частями;
 $P(t)$ – вероятность безотказной работы;
 $g(t)$ – вероятность отказа;
 R_n – сопротивление электрическое номинальное, Ом;
 R_p – сопротивление электрическое расчетное, Ом;
 t – время непрерывной работы, нормативная наработка, ч;
 t_2 – наработка, равная одной тыс.ч.;
 $t_{np,cp}$ – периодичность профилактики фактическая, тыс. ч.;
 T_0 – средняя наработка на отказ (между отказами) тыс.ч.;
 $T_в$ – время восстановления, ч.;
 T_p – ресурс изделия, элемента ($T_{p,p}$ – расчетный, $T_{p,o}$ – по техническим условиям), тыс.ч.;
 $T_{с.л}$ – срок службы изделия, элемента, лет;
 U_p – напряжение расчетное, в;
 $U_{ту}$ – напряжение допустимое по ТУ, в;
 Z – число включений циклов, сочленений и т.п. (Z_0 – по техническим условиям,
 Z_p – расчетное), шт.;
 α ($\alpha_1; \alpha_2$) – поправочные коэффициенты;
 Λ – интенсивность отказов блока прибора

λ – интенсивность отказов элементов ЭРЭ, ИС и т.д. (λ_0 – справочное значение, λ_p – расчетное значение), 1/ч;

τ – температура окружающей элемент среды ($\tau_{o.n.}$ – номинальная по ТУ, $\tau_{o.max.}$ – максимально допустимая по ТУ, τ_p – рабочая, $\tau_{p.max.}$ – максимально-возможная рабочая), °С;

ω – угловая скорость, рад/с.

Ведомость расчета количества запасных частей
 Наименование изделия по обеспечению ресурса 20000 ч. При вероятности обеспечения

$$P(N)_{зап} = P(N)_1 = \sqrt[3]{P(N)_{зад}}; P(N)_2 = \sqrt[3]{P(N)_{зад}}; P(N)_3 = \sqrt[3]{P(N)_{зад}}$$

Кодовое наименование и тип элемента	Номинальные величины по ТУ на поставку	Обозначение документа на поставку	Количество элементов в изделии, шт., $N_{из}$	Номер группы элемента по виду отказа	Данные по ТУ на поставку (справочные)								
					Ресурс назначенный, тыс. ч, $T_{но}$	Нормативная наработка, тыс. ч	Интенсивность отказов, $\lambda_0 \cdot 10^6$	Коэффициент нагрузки допустимый $K_{н.д}$	Температура окружающей среды, °С		Допустимая доля времени работы, при $T_{макс}$, %, L_0	Допустимое число срабатываний, (циклов, переключений), тыс. шт., Z_0	
									номинальная $T_{н.д}$	Максимальная $T_{макс}$			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	

Коэффициент нагрузки расчетный $K_{н.р.}$	Условия эксплуатации		Доля времени 226тботы при $T_{р.макс.}$ %, $L_{ср}$	Среднее число срабаты- ваний (циклов) в час, шт., $Z_{ср}$	Коэффициент использования $K_{и}$
	Температура окружающей среды, °С				
	рабочая $T_{р.}$	Максимальная рабочая $T_{р.макс.}$			
14	15	16	17	18	19

Расчетные величины

Поправочные коэффициенты $\sigma = f(K_n, t)$		Ресурс элементов тыс. ч		Кол. Запасных элементов для профилактических замен шт., $N_{з.пр}$	Периодичность технического обслуживания с учетом K_n тыс. ч, $t_{сер}$	Расчетное значение интенсивности отказов, $\lambda \times 10^6$, λ_p	Ожидаемое количество отказов за время $t = \tau$ шт., m_0	Количество зап. Частей по обеспечению $P(N)$ за время $t = \tau$ шт., N_z	Значение вероятности обеспечения зап. Частями за время $t = \tau$ ч, $P(N)$	Общее количество запасных частей $N_z = N_{з.пр} + N_z$ шт., N_z	Примечание
a_1	a_2	до среднего ремонта $T_{сер}$	средний $T_{сер}$				Отношение $\frac{T_z \cdot N_p}{T_0}$				
20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31

Таблица 3.1 – Максимальные значения интенсивностей отказов (для учебных целей)

Наименование элемента (группа, вид, тип)	Интенсивность отказов $\times 10^6/1/ч$
1	2
Полупроводниковые (ПП) цифровые интегральные схемы (ИС) 1-й степени интеграции	0,40
ПП цифровые ИС 2-й степени интеграции	0,45
ПП цифровые ИС 3-й степени интеграции	0,50
ПП цифровые ИС 4-й степени интеграции	0,60
ПП аналоговые ИС 1-й степени интеграции	0,45
ПП аналоговые ИС 2-й степени интеграции	0,55
ПП аналоговые ИС 3-й степени интеграции	0,65
Транзисторы полевые малой мощности	0,30
Транзисторы полевые средней мощности	0,35
Транзисторы полевые большой мощности	0,45
Транзисторы кремниевые малой мощности	0,40
Транзисторы кремниевые средней мощности	0,45
Транзисторы кремниевые большой мощности	0,50
Транзисторы германиевые малой мощности	0,45
Транзисторы германиевые средней мощности	0,55
Транзисторы германиевые большой мощности	0,65
Транзисторы маломощные в ключевом режиме	0,40
Транзисторы большой и средней мощности в 228теп-чвом режиме	0,60
Диоды высокочастотные кремниевые	0,20
Диоды высокочастотные германиевые	0,30
Диоды выпрямительные в ключевом режиме	0,15
Диоды выпрямительные маломощные, $I_{р.выпр} < 300 мА$	0,20
Диоды выпрямительные средней мощности, $I_{р.выпр} = 0...10 А$	0,50
Диоды-столбы высоковольтные выпрямительные	0,80
Блоки (мосты) выпрямительные кремниевые, $I_{р.выпр} < 400 мА$	0,40
Блоки (мосты) выпрямительные германиевые, $I_{р.выпр} > 400 мА$	1,10
Стабилитроны маломощные, $P_{ном} < 1 Вт$	0,9
Стабилитроны средней мощности $P_{ном} < 5 Вт$	1,25
Варикапы	0,20
Светодиоды	0,70
Диоды гужальные и обратные	0,27
Диоды инфракрасного излучения	0,80
Фотодиоды	0,70
Диоды сверхвысокочастотные	6,00
Однотроны	0,75
Тристоры маломощные, $I_{р} < 2 А$	2,20
(Тристоры маломощные, $I_{р} < 2...10 А$	4,40
Резисторы постоянные непроволочные, $P_{ном} < 0,5 Вт$, ток постоянный	0,05
Резисторы постоянные непроволочные, $P_{ном} < 0,5 Вт$ ток переменный	0,10
Резисторы постоянные непроволочные, $P_{ном} < 1...2 Вт$, ток постоянный	0,08
Резисторы постоянные непроволочные, $P_{ном} < 1...2 Вт$, ток переменный	0,15
Резисторы постоянные проволочные, $P_{ном} < 10 Вт$	0,40
Резисторы постоянные проволочные, $P_{ном} < 50 Вт$	0,80
Резисторы переменные непроволочные	0,50
Резисторы переменные непроволочные, с выключателем	1,30
Резисторы переменные проволочные	1,20
Резисторы переменные проволочные полупрового типа	1,10
Терморезисторы	0,20
Варисторы	0,40
Фоторезисторы	0,50
Конденсаторы слюдяные	0,03
Конденсаторы танталовые	0,02
Конденсаторы керамические	0,05

Продолжение таблицы 3.1

1	2
Конденсаторы бумажные	0,07
Конденсаторы металлобумажные	0,06
Конденсаторы пластмассовые	0,07
Конденсаторы нефлюорированные	0,01
Конденсаторы электролитические алюминиевые	0,55
Конденсаторы электролитические танталовые	0,25
Индикаторы стрелочные	4,00
Индикаторы цифровые на жидких кристаллах	3,25
Индикаторы цифровые вакуумные (серии ИИ)	3,50
Индикаторы цифровые вакуумные выкатные (серии ИВ)	0,80
Индикаторы цифровые вакуумные люминесцентные (серии ИВ)	2,00
Индикаторы цифробумажные на основе светодиодов одиоразрядные	1,00
Индикаторы цифробумажные на основе светодиодов многоразрядные	3,00
Индикаторы люминесцентные сигнальные	3,30
Лампочки сигнальные, накаленные	8,00
Лампочки сигнальные, вакуумные	10,00
Кинескопы черно-белого изображения	7,50
Кинескопы цветного изображения	9,50
Трубки осциллографические (ЭЛТ)	10,00
Катушки индуктивности, $d_{\text{серд.}}$ < 0,1 мм	0,30 0,20 0,30 0,20
Катушки индуктивности, $d_{\text{серд.}}$ > 0,1 мм	
Дроссели, $d_{\text{серд.}}$ < 0,1 мм	
Дроссели, $d_{\text{серд.}}$ > 0,1 мм	
Обмотки сетевых трансформаторов, $d_{\text{серд.}}$ < 0,1 мм	0,75
Обмотки сетевых трансформаторов, $d_{\text{серд.}}$ > 0,1 мм	0,50
Трансформаторы входные	0,90
Трансформаторы выходные	0,90
Трансформаторы импульсные	0,13
Трансформаторы высоковольтные	2,50
Реле электромагнитные общего применения	2,50 ^а
Реле электромагнитные миниатюрные	0,60 ^а
Герконы	0,30 ^а
Соединители (разъемы) игнеосевные	0,20 ^а
Гнезда, клеммы	0,70 ^а
Выключи двухполюсные	0,50
Зажимы	0,01 ^а
Тумблеры, кнопки	0,40 ^а
Переключатели галетные	0,40 ^а
Переключатели многобарбитные	0,30 ^а
Переключатели многобарбитные модульные (ПЗК) с независимой фиксацией	0,30 ^а
Переключатели многобарбитные модульные (ПЗК) с зависимой фиксацией	0,37 ^а
Макропереключатели типа МП	0,30
22Элементы (гнезда) телевизионные	2,12
Листосты контактные	0,20
Плата (колонда) контактная межблочного монтажа	0,40 ^а
Провод монтажный	0,30
Кабели (шнуры)	0,60 ^а
Кабели (шнуры) питания	2,00 ^а
Держатели предохранителей	0,20
Предохранители	5,00
Изоляторы	0,50
Шайбы, прокладки изолирующие	0,75
Соединения гайкой, ток допустимый	0,04
Соединения гайкой, ток пульсирующий	0,40
Соединения вкруткой	0,02

Платы расчетного монтажа	0,20
Линии задержки	0,75
Продолжение таблицы 3.1	
1	2
Фильтры пьезокерамические	0,25
Резонаторы кварцевые	0,37
Матричные проводы лепочные	0,10
Ферритовые элементы	0,01
Головки магнитные малотабаритные	7,90
Электродвигатели асинхронные, сельсины	12,30
Электродвигатели синхронные	0,51
Электродвигатели постоянного тока	13,40
Батареи одноуровневые	43,00
Батареи зарядные	2,00
Аккумуляторы	10,30
Датчики электромагнитные пассивные	15,00
Конструкции несущие легкосплавных субблоков	0,10
Конструкции несущие РЭА	3,00
Пружины	2,20
Соединений механической пайкой	0,06
Соединения вставками 3... 5 мм	0,001

Примечание: Значения интенсивностей отказов элементов, помеченные символом, приведены соответственно:

- * – на один контакт при номинальном токе;
- ** – на одну контактную группу при номинальном токе;
- *** – на один штырек при номинальном токе;
- **** – каждый метр длины при номинальной плотности тока в проводе (неполный метр длины должен считаться как один метр).

Значения поправочных коэффициентов (для учебных целей)

Таблица 4.1 – Значения поправочных коэффициентов α_3 , учитывающих влияние механических воздействий [6]

Условия эксплуатации	Значение α_3
Лабораторные	1,00
Стационарные	1,07
Полевые	1,07
Корабельные	1,37
Автомобильные	1,46
Железнодорожные	1,57
Самолетные	1,65

Таблица 4.2 – Значения поправочных коэффициентов α_4 , учитывающих влияние относительной влажности

Относительная влажность	Значение α_4
60...70% при $t = 20...40^\circ\text{C}$	1,00
90...98% при $t = 20...25^\circ\text{C}$	2,0
90...98% при $t = 30...40^\circ\text{C}$	2,5

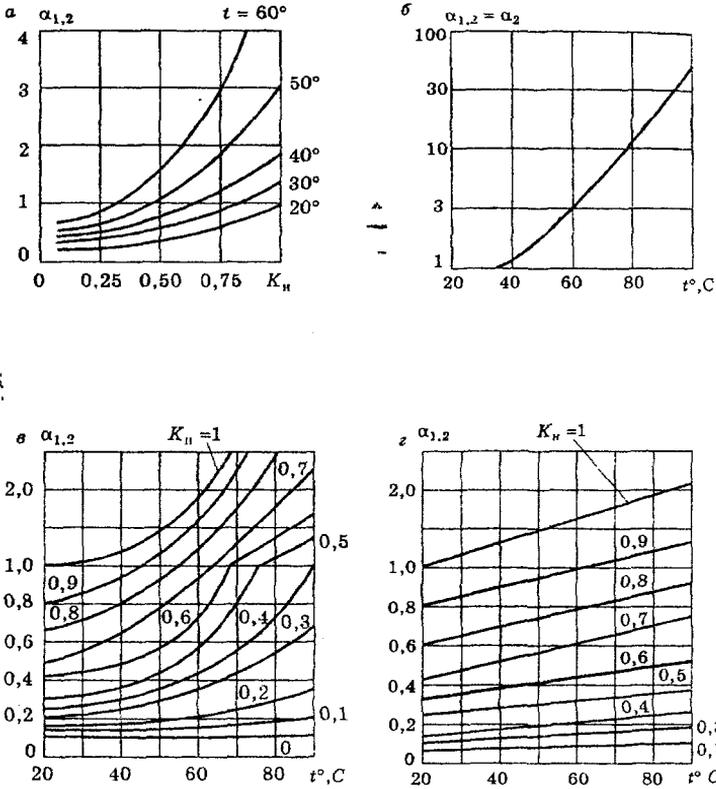


Рис. 5.1. Обобщенные зависимости поправочного коэффициента $\alpha_{1,2}$ от температуры и коэффициента нагрузки:

- а) для контактных элементов;
- б) для соединений пайкой;
- в) для резисторов типов МЛТ и ОМЛТ;
- г) для переменных проволочных резисторов

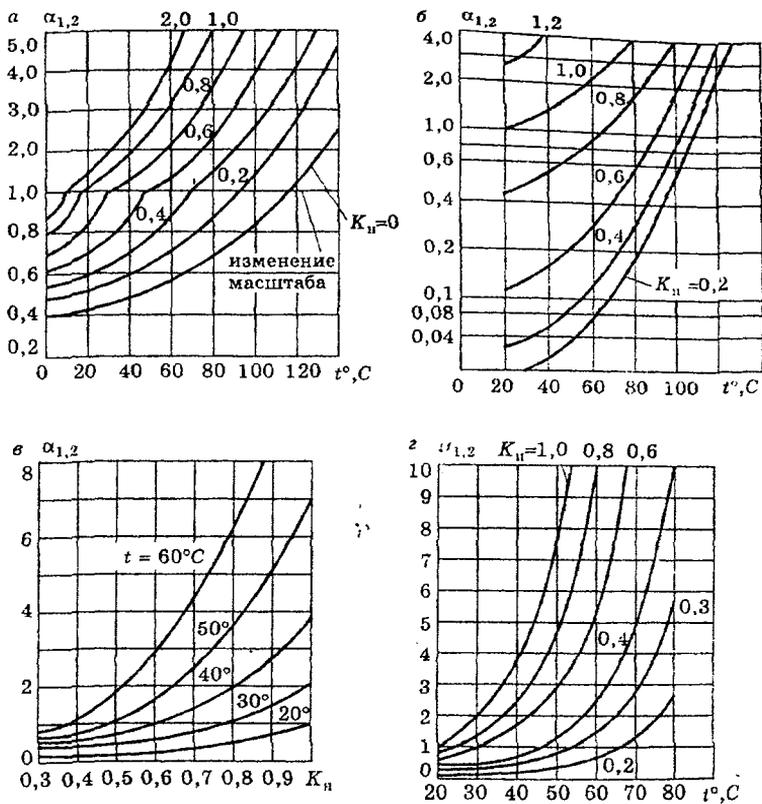


Рис. 5.2. Обобщенные зависимости поправочного коэффициента $\alpha_{1,2}$ от температуры и коэффициента нагрузки:

- а) для резисторов;
- б) для неполярных конденсаторов;
- в) для изделий, имеющих обмотки;
- г) для электролитических конденсаторов

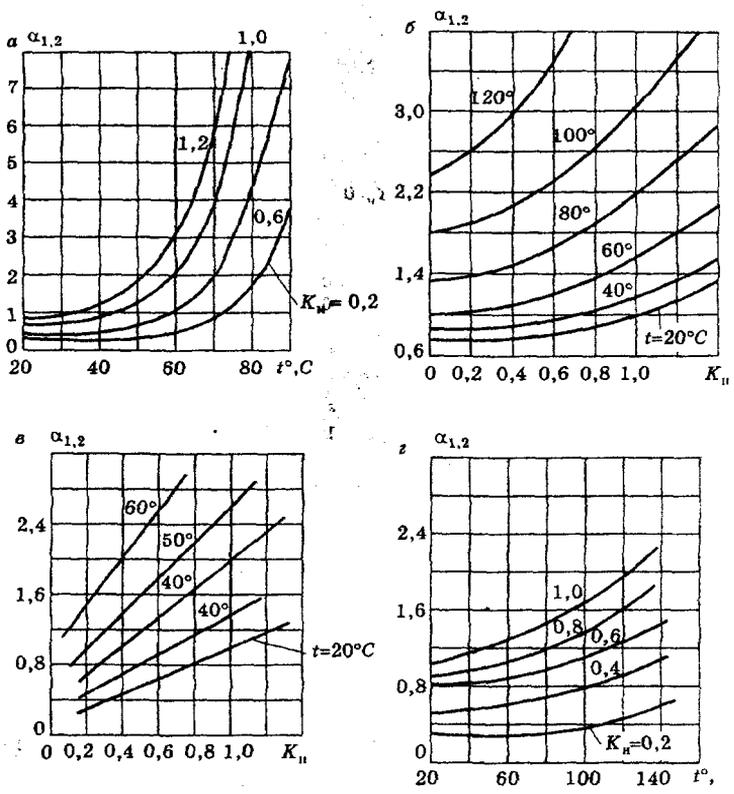


Рис. 5.3. Обобщенные зависимости поправочного коэффициента $\alpha_{1,2}$ от температуры и коэффициента нагрузки для полупроводниковых приборов:

- а) германиевых диодов;
- б) кремниевых диодов;
- в) германиевых транзисторов;
- г) кремниевых транзисторов

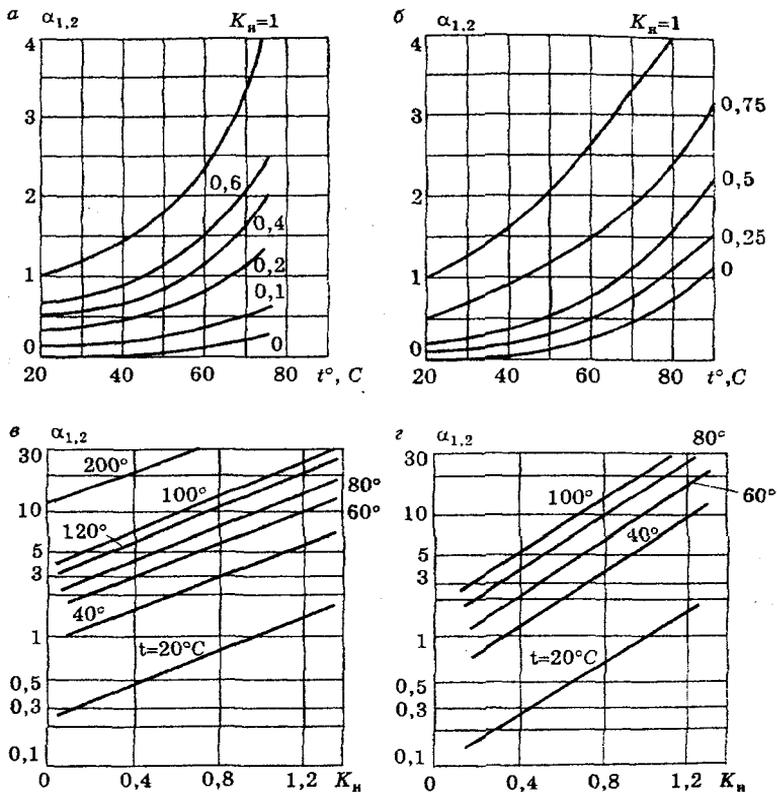


Рис. 5.4. Обобщенные зависимости поправочного коэффициента $\alpha_{1,2}$ от температуры и коэффициента нагрузки:

- а) для кремниевых высокочастотных транзисторов;
- б) для германиевых высокочастотных транзисторов;
- в) полупроводниковых цифровых интегральных микросхем;
- г) для полупроводниковых линейно-импульсных интегральных микросхем

Таблица 6.1 – Средние значения времени восстановления t_v элементов
и функциональных частей РЭУ (для учебных целей)

Элемент, функциональная часть РЭУ	t_v , ч
Цифровые интегральные микросхемы малой и средней степени интеграции	1,5
Цифровые интегральные микросхемы большой и сверхбольшой степени интеграции	0,5
Аналоговые интегральные микросхемы малой и средней степени интеграции	1,2
Транзисторы большой мощности	0,7
Транзисторы средней и малой мощности	0,8
Резисторы постоянные	0,5
Резисторы переменные	1,2
Конденсаторы неполярные	1,1
Конденсаторы электролитические	0,55
Диоды (кроме выпрямительных)	0,6
Диоды выпрямительные	0,4
Блоки (мосты) выпрямительные	0,3
Стабилитроны	0,5
Переключатели	0,7
Соединители (разъёмы)	2,0
Катушки индуктивности	1,3
Трансформаторы	2,2
Дроссели	1,4
Предохранители	0,1
Платы печатного монтажа	3,0
Монтажные провода	0,5
ТЭЗы устройств цифровой обработки информации	0,5
Индикаторные устройства	1,5
Сигнальные и индикаторные лампочки	0,2
Реле	2,6
Тумблеры, кнопки	0,6
Зажимы, гнёзда, клеммы	0,8
Шнуры питания	0,3
Пайки	0,5

Литература

1. Астафьев А.В. Окружающая среда и надежность радиотехнической аппаратуры. –М.: Энергия, 1975
2. Барнс Дж. Электронное конструирование и надежность. Методы борьбы с помехами. Пер. с англ. – М.: Мир, 1992
3. Боровиков С.М. Теоретические основы конструирования, технологии и надежности. –Мн.: Дизайн ПРО,1999 –336 с
4. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. – М.: Наука, 200X
5. Каган Б.М. Мкртумян И.Б. Основы эксплуатации ЭВМ. Учеб. пособие. – М.: Энергоатомиздат. 1988. –424 с.
6. Кофанов Ю.Н. Теоретические основы конструирования, технологии РЭС. Уч. пособие для вузов – М.: Радио связь. 1991.-359 с.
7. Надежность в технике. Основные понятия, термины и определения. ГОСТ 27002-95 – М.:Издательство стандартов, 1990
8. Основы эксплуатации радиоэлектронной аппаратуры /Быкадоров А.К., Кульбак, Л.К., Лавриненко В.Ю.и др/ Под ред. Лавриненко В.Ю.-М.: - Вш. шк. 1984
9. Основные положения. Испытание на надежность. ГОСТ-16504-91. –М: Изд. стандартов РФ
10. Пархоменко П.П., Согомоян Е.С. Основы технической диагностики. – М.: Энергоатомиздат, 1982
11. Прасов М.Т. Основы проектирования и надежности электронных средств. Уч. пособие. - ОрелГТУ: -2005
12. Порядок выбора средств испытаний. ГОСТ 14307-91. –М.: Изд. стандартов РФ
13. Теория надежности радиоэлектронных систем в примерах и задачах / Дружинин Г.В., Степанов С.В. и др/ Под ред. Дружинина Г.В.
14. Уэнсли Д. Высоконадежная система с тройным резервированием для управления технологическими процессами / Электроника. 1985 №4 с.32-39 /
15. Шишонко Н.А. и др. Основы теории надежности и эксплуатации радиоэлектронной техники. М.: Совесткое радио. – 1964

Учебное издание

*Прасов Михаил Тихонович
Степанов Юрий Сергеевич*

Эксплуатационная надежность электронных средств

Учебное пособие

Технический редактор О.Г. Кожус

Федеральное государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Государственный университет – учебно-научно- производственный комплекс»

Подписано к печати 29.12.2011 г.

Формат 60x84 1/16

Гарнитура Times New Roman

Печать офсетная.

Усл. печ. л. 9,7. Тираж 500 экз.

Заказ № 173/1102

ООО «Издательский дом «Спектр»»,
119048, г. Москва, ул. Усачева, д. 35, стр. 1.
www.idspektr.ru, E-mail: idspektr@rambler.ru

Отпечатано с готового оригинал-макета
на полиграфической базе
ФГОУ ВПО «Госуниверситет-УНПК»,
302030, г. Орел, ул. Московская, 65.