

Министерство образования Республик Беларусь
Учреждение образования
«Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»

Кафедра радиоэлектронных средств

С.М. Боровиков

НАДЁЖНОСТЬ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

Авторская редакция
учебного пособия для студентов специальности
I-38 02 03 – «Техническое обеспечение безопасности»
(специализация – «Технические средства
защиты информации»)

Минск 2007

АННОТАЦИЯ

Рассматриваются методы математического описания отказов, модели отказов и суть количественных показателей, используемых на практике для описания надёжности элементов и устройств.

Приводится сравнительная характеристика надёжности, в частности безотказности, типовых элементов изделий радиоэлектроники и приборостроения.

Излагаются методы оценки показателей надёжности устройств и методы повышения надёжности радиоэлектронных средств, в том числе с использованием резервирования.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	6
Раздел 1. Основы теории надёжности	8
1.1. Причины обострения проблемы надежности РЭУ.....	8
1.2. Основные понятия и определения теории надёжности.....	8
1.3. Понятие отказа. Классификация отказов.....	10
1.4. Схемы соединения элементов в устройстве с точки зрения надёжности.....	11
1.5. Причины отказов РЭУ.....	12
1.6. Модели законов распределения времени до отказа.....	13
1.7. Показатели надёжности РЭУ и их элементов	15
1.8. Вероятность безотказной работы и вероятность отказа.....	18
1.9. Интенсивность отказов.....	20
1.10. Нарботка на отказ (средняя наработка на отказ)	22
1.11. Среднее время безотказной работы.....	23
1.12. Параметр потока отказов.....	24
1.13. Среднее время восстановления и вероятность восстановления.....	24
1.14. Эксплуатационные коэффициенты надёжности.....	25
1.15. Показатели долговечности.....	27
Раздел 2. Надёжность элементов изделий радиоэлектроники и приборостроения	30
2.1. Интенсивность отказов как основная характеристика надёжности элементов.....	30
2.2. Коэффициенты электрической нагрузки элементов.....	32
2.3. Формулы для определения коэффициентов электрической нагрузки некоторых элементов.....	33
2.4. Краткая характеристика надёжности элементов.....	34
2.5. Учет влияния на надёжность элементов электрического режима и условий работы.....	36
Раздел 3. Оценка показателей надёжности проектируемых устройств	39
3.1. Оценка показателей надёжности проектируемых РЭУ (основные расчётные соотношения).....	39
3.2. Ориентированный (приближенный) расчёт показателей надёжности проектируемых РЭУ.....	41

3.3. Расчёт показателей надёжности проектируемых РЭУ с учётом коэффициентов электрической нагрузки и условий работы элементов в составе устройств.....	43
3.4. Примеры оценки показателей надёжности проектируемого РЭУ.....	45
3.5. Принципы расчёта безотказности РЭУ с учётом цикличности работы.....	54
3.6. Расчёт показателей надёжности при разных законах распределения времени до отказа элементов.....	57
3.7. Параметрическая надёжность РЭУ.....	60
3.7.1. Параметрическая надёжность и функционирование РЭУ.....	60
3.7.2. Причины, обуславливающие появление постепенных отказов.....	61
3.8. Оценка параметрической надёжности РЭУ на этапе проектирования	62
3.9. Упрощенная оценка уровня параметрической надёжности устройств.....	73
Раздел 4. Резервирование как метод повышения надёжности РЭУ.....	76
4.1. Понятие эксплуатационной надёжности РЭУ.....	76
4.2. Общая характеристика методов повышения надёжности РЭУ.....	76
4.3. Общая характеристика резервирования.....	77
4.4. Характеристика постоянного резервирования.....	79
4.5. Оценка показателей безотказности устройства при наличии постоянного резервирования.....	80
4.6. Характеристика резервирования замещением.....	84
4.7. Анализ безотказности РЭУ при наличии резервирования замещением (нагруженный резерв).....	86
Раздел 5. Обеспечение надёжности устройств на этапах проектирования, производства и эксплуатации.....	89
5.1. Общая характеристика методов повышения надёжности РЭС на этапе проектирования.....	89
5.2. Априорное (начальное) ограничение нагрузки элементов как метод повышения надёжности РЭУ.....	89
5.3. Выбор коэффициентов нагрузки с учётом производственного разброса параметров элементов и питающих напряжений.....	90
5.4. Расчёт норм надёжности на составные части РЭУ.....	91
5.5. Схемотехнические способы повышения надёжности РЭУ.....	93

5.6. Квазирезервирование.....	94
5.7. Общая характеристика методов обеспечения надёжности на этапе производства.....	94
5.8. Тренировка как способ отбраковки потенциально ненадежных элементов.....	95
5.9. Практические приёмы тренировки полупроводниковых приборов.....	97
5.10. Технологический прогон РЭУ.....	99
5.11. Отбраковка элементов методами индивидуального прогнозирования надёжности.....	100
5.12. Общая характеристика методов построения прогнозирующего правила.....	101
5.13. Методы статистических решений.....	102
5.14. Метод потенциальных функций.....	104
5.15. Метод дискриминантных функций.....	105
5.16. Метод пороговой логики.....	106
5.17. Общая характеристика методов повышения надёжности РЭС на этапе эксплуатации.....	107
5.18. Прогнозирование постепенных отказов методом экстраполяции (случай однопараметрических устройств).....	107
5.19. Прогнозирование работоспособности многопараметрических устройств.....	108
ПРИЛОЖЕНИЕ 1. Максимальные значения интенсивностей отказов элементов РЭУ (для учебных целей).....	110
ПРИЛОЖЕНИЕ 2. Значения поправочных коэффициентов (составлено для учебных целей).....	114
ПРИЛОЖЕНИЕ 3. Средние значения случайного времени восстановления t_i элементов и функциональных частей РЭУ (для учебных целей).....	119
ПРИЛОЖЕНИЕ 4. Значения нормальной функции распределения.....	120
ЛИТЕРАТУРА	124

ВВЕДЕНИЕ

Целью учебной дисциплины является изучение основ теории надёжности и методов оценки показателей надёжности технических изделий с ориентацией на элементы и устройства радиоэлектроники и приборостроения.

В учебном пособии рассматриваются:

- терминология и основные понятия в области надёжности технических изделий;
- методы математического описания отказов, модели отказов, используемые на практике для элементов и устройств;
- суть количественных показателей, используемых на практике для описания надёжности элементов и устройств;
- сравнительная характеристика надёжности, в частности безотказности, типовых элементов изделий радиоэлектроники и приборостроения;
- математические модели пересчёта справочных значений интенсивностей отказов элементов на конкретный электрический режим и условия работы;
- используемые на практике методы оценки показателей безотказности и ремонтпригодности устройств;
- методы повышения надёжности радиоэлектронных средств (РЭС);
- виды резервирования и область его применения.

Пройдя подготовку по дисциплине, студент **должен уметь**:

- находить справочные данные о показателях надёжности (безотказности, долговечности и сохраняемости) типовых элементов, пользуясь технической документацией – техническими условиями, ОСТами, каталогами и т.п.;
- из документации на устройства радиоэлектроники и приборостроения получать информацию о показателях надёжности и давать физическую трактовку значениям этих показателей;
- выполнять инженерный пересчёт справочных значений интенсивностей отказов элементов на конкретный электрический режим и температуру;
- выполнять оценку показателей надёжности проектируемых устройств с учётом внезапных отказов элементов;
- выполнять инженерный пересчёт справочных значений показателей долговечности (ресурса, срока службы) на конкретный электрический режим и температуру;
- осуществлять выбор метода прогнозирования для оценки индивидуальной безотказности элементов.

Учебная дисциплина базируется на знаниях, полученных студентами при изучении следующих дисциплин:

- «Высшая математика», в первую очередь, разделы по дифференциальному и интегральному анализам;
- «Физика»;
- «Прикладная математика»;
- «Основы аналоговой и цифровой схемотехники».

Раздел 1. ОСНОВЫ ТЕОРИИ НАДЁЖНОСТИ

1.1. Причины обострения проблемы надёжности РЭУ

В настоящее время проблема надёжности РЭУ заметно обострилась. Объясняется это следующим:

1. РЭУ заметно усложнились в схемотехническом отношении.
2. Ужесточились условия, в которых эксплуатируется современная радиоэлектронная аппаратура. Они часто характеризуются большим перепадом температур, высоким или низким давлением, наличием механического воздействия и т.д.
3. Повысились требования к точности функционирования РЭУ.
4. Повысилась «цена» отказа РЭУ: он может привести к серьезным техническим и экономическим потерям.
5. В ряде случаев человек-оператор не имеет непосредственного контакта с РЭУ (электронные датчики контроля хода технологических процессов в агрессивных средах, РЭУ на непилотируемых летательных объектах и т.п.).

1.2. Основные понятия и определения теории надёжности

Теория надёжности – это научная дисциплина, занимающаяся вопросами обеспечения высокой надёжности технических изделий при наименьших затратах.

Основными понятиями теории надёжности являются понятия «надёжность» и «отказ».

Под надёжностью понимают свойство изделия сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции, в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования.

Надёжность является комплексным свойством, которое в зависимости от назначения изделия и условий его применения может включать **безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость** или определенные сочетания этих свойств.

Нередко под надёжностью в узком смысле слова понимают безотказность изделия.

Многие понятия и определения теории надёжности базируются на таких понятиях, как работоспособность и безотказность [1-3].

Безотказность – свойство изделия непрерывно сохранять работоспособное состояние в течение некоторого времени или наработки. Под работоспособным состоянием (кратко – *работоспособностью*) понимают состояние изделия, при котором оно способно выполнять предписанные ему функции, имея значения выходных параметров в пределах норм, оговоренных в технической документации.

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

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

Сохраняемость – свойство изделия сохранять в заданных пределах значения параметров, характеризующих способность изделия выполнять требуемые функции, в течение и после хранения и (или) транспортирования.

С точки зрения восстанавливаемости различают восстанавливаемые и невосстанавливаемые изделия. **Восстанавливаемые** изделия в случае возникновения отказа подвергаются ремонту и далее снова используются по назначению. **Невосстанавливаемые** изделия не подлежат либо не поддаются ремонту по техническим или экономическим соображениям.

В теории надёжности различают надёжность устройств и надёжность входящих в него элементов. Устройства чаще являются изделиями восстанавливаемыми. Элементы – обычно изделия невосстанавливаемые.

РЭУ, как системы, с точки зрения надёжности могут быть простыми и сложными.

Для **простой** отказ системы в целом наступает в случае выхода из строя хотя бы одного из элементов (пример – телевизор).

Для **сложной** системы в случае отказа ее составных частей происходит снижения эффективности ее функционирования, так как функцию вышедшего из строя устройства может взять на себя оператор. Например, при отказе устройства автоматического поворота антенны эту функцию берет на себя человек, выполняя операцию поворота вручную.

1.3. Понятие отказа. Классификация отказов

Под **отказом** понимают полную или частичную потерю изделием работоспособности вследствие ухода одного или нескольких параметров за пределы установленных норм.

Под **наработкой** в общем случае понимают продолжительность работы изделия, выраженную в часах, циклах переключения или других единиц в зависимости от вида и функционального назначения изделия. Например, для интегральной микросхемы наработка выражается в часах, для переключателя – в циклах переключения, для счетчика бета-излучения – в импульсах и т.д. При этом, если изделие работает с перерывами, то в суммарную наработку включается только периоды работы (функционирования) изделия.

Под **наработкой до отказа** понимают суммарную наработку изделия от момента вступления в работу (эксплуатацию) до возникновения первого отказа.

В настоящее время существуют различные схемы классификации отказов. Одна из схем, широко используемая в теории и практике надёжности РЭУ, представлена в табл.1.1.

Таблица 1.1

Классификация отказов РЭУ и их элементов

Классификационный признак	Вид отказа
Характер возникновения отказа	Внезапный Постепенный
Время существования отказа	Постоянный Временный Перемежающийся (временные отказы, следующие один за другим)
Характер проявления отказа	Явный Неявный
Зависимость отказов между собой	Зависимый Независимый
Причина возникновения отказа	Конструктивный Производственный Эксплуатационный Деградационный

Внезапный отказ (ранее называемый также мгновенным) – это отказ, характеризующийся скачкообразным изменением значения одного или нескольких параметров изделия.

Под **постепенным** (ранее называемым также параметрическим) понимают отказ, возникающий в результате постепенного, обычно непрерывного и монотонного изменения значения одного или нескольких параметров изделия.

Четкой границы между внезапным и постепенным отказами провести не удастся. В [4] дано следующее определение внезапного отказа: это отказ, наступление которого не может быть предсказано предварительным контролем или диагностированием.

Сбой (*временный отказ*) – это самоустраняющийся отказ или однократный отказ, устраняемый незначительным вмешательством оператора.

Перемежающийся отказ – это многократно возникающий самоустраняющийся отказ одного и того же характера.

Под **явным** понимают отказ, обнаруживаемый визуально или штатными методами и средствами диагностирования при подготовке объекта к применению или процессе его применения по назначению.

Под **неявным** (скрытым) отказом понимают отказ, не обнаруживаемый визуально или штатными средствами и методами контроля и диагностирования, но выявляемый при проведении технического обслуживания или специальными методами диагностирования.

Независимым называют отказ, не обусловленный другими отказами.

Зависимым называют отказ, обусловленный другими отказами.

Под **конструктивным** понимают отказ, возникающий по причине, связанной с несовершенством или нарушением установленных правил и (или) норм проектирования.

Под **производственным** понимают отказ, связанный с несовершенством или нарушением установленного процесса изготовления или ремонта.

Под **эксплуатационным** понимают отказ, возникающий по причине, связанной с нарушением установленных правил или условий эксплуатации.

Под **деградационным** понимают отказ, обусловленный естественными процессами старения, изнашивания, коррозии и усталости при соблюдении всех установленных правил и норм проектирования, изготовления и эксплуатации.

1.4. Схема соединения элементов в устройстве с точки зрения надёжности

В теории и практике надёжности РЭУ различают три схемы (модели) соединения элементов с точки зрения надёжности.

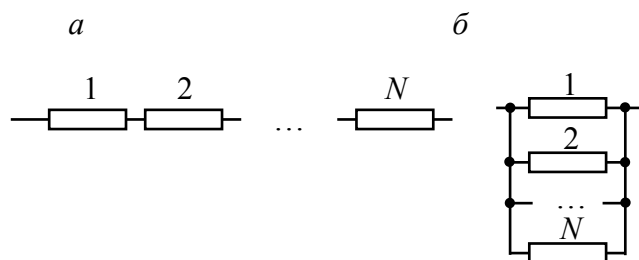


Рис.1.1. Схемы (модели) соединения элементов в устройстве с точки

зрения надёжности:

- а** – последовательное соединение;
б – параллельное соединение;
N – количество элементов в устройстве

1. Последовательное соединение элементов (рис.1.1, а). В этом случае отказ РЭУ возникает в случае отказа хотя бы одного из элементов.

2. Параллельное соединение элементов (рис.1.1, б). В этом случае отказ устройства наступает лишь при отказе всех элементов. Эта модель обычно характерна для устройств или частей РЭУ, имеющих резервирование.

Например, параллельное соединение элементов характерно для многожильного монтажного провода, если каждый проводник (жилу) рассматривать как элемент.

3. Смешанное соединение элементов. Это сочетание двух видов соединений.

1.5. Причины отказов РЭУ

Замечено, что на долю ошибок проектирования РЭУ приходится до 40...50% всех отказов (табл.1.2).

Отказы из-за ошибок (дефектов) производства возникают в 30...40% случаев (табл.1.3).

На долю ошибок оператора приходится (по зарубежным данным) примерно 20...30% всех отказов РЭУ.

Таблица 1.2

Распределение отказов в зависимости от ошибок проектирования

Причина отказа	Примерно число отказов, %
Недостатки электрических схем	До 30
Недостатки механической конструкции	Примерно 10
Неправильный учет возможностей оператора	Нет данных
Неправильный выбор элементов	10
Неправильный выбор режимов работы элементов	10

Замечено, что примерно в 75...80% случаев различные причины отказов дают о себе знать в виде отказа комплектующих элементов. Это накладывает заметный психологический отпечаток на потребителей относительно истинных причин отказов.

Таблица 1.3

Распределение отказов в зависимости от ошибок производства

Причина отказа	Примерно число отказов, %
Плохая механическая сборка :	
чисто механическая	5
герметизация	5
упаковка и транспортировка	5
Дефекты монтажа	20...25
Другие технологические операции	10

1.6. Модели законов распределения времени до отказа

По своей физической сущности отказы элементов и устройств являются событиями случайными. Поэтому для количественного описания отказов и вообще показателей надёжности пригодны приемы теории вероятностей [5].

Анализируя отказы, нетрудно установить, что случайной величиной, описывающей отказы, является время до отказа (в общем случае наработка до отказа).

Установлено, что **время до отказа**, или, что то же самое, **время безотказной работы**, неплохо описывается следующими моделями законов распределения:

- а) экспоненциальной;
- б) моделью Вейбулла;
- в) нормальной;
- г) логарифмически нормальной.

Для экспоненциальной модели плотность распределения времени до отказа описывается выражением (рис.1.2)

$$w(t) = \lambda e^{-\lambda t}; \lambda > 0, t \geq 0, \quad (1.1)$$

где λ – параметр модели (распределения).

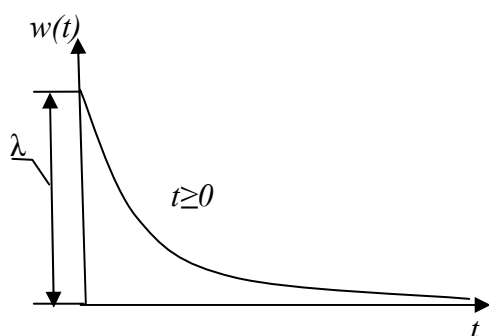


Рис.1.2 Экспоненциальное распределение времени до отказа

В теории и практике надёжности РЭУ часто употребляют термин «**экспоненциальный закон надёжности**», имея в виду, что время до отказа распределено по экспоненциальной модели.

Для модели Вейбулла плотность распределения времени до отказа

описывается выражением

$$w(t) = \rho \beta t^{\beta-1} e^{-\rho t^\beta}, \quad (1.2)$$

где ρ , β – параметры модели (распределения).

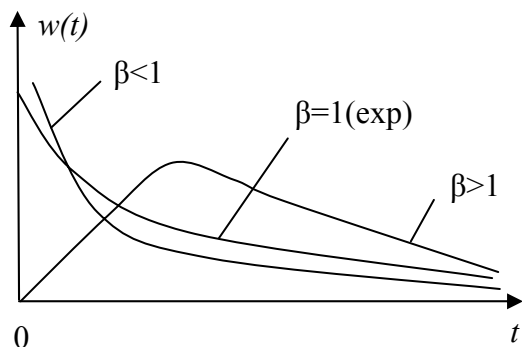


Рис.1.3. Распределение времени до отказа по закону Вейбулла

Параметр β называют коэффициентом формы. От значения этого коэффициента во многом зависит график функции $w(t)$ (рис.1.3).

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

пределению.

Для нормальной модели плотность распределения времени до отказа описывается выражением

$$w(t) = \frac{1}{\sigma_t \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-t_{cp})^2}{2\sigma_t^2}}, \quad (1.3)$$

где t_{cp} , σ_t – параметры модели (распределения).

Здесь t_{cp} – среднее время безотказной работы;

σ_t – среднее квадратическое отклонение времени безотказной работы.

Для нормальной модели вид функции $w(t)$ показан на рис.1.4.

В случае нормальной модели говорят об усеченном распределении, ибо область отрицательных значений времени до отказа отбрасывают (отсекают), как не имеющую физического смысла.

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

Проводя испытания элементов или устройств на надёжность и фиксируя время до отказа каждого изделия, получим ряд

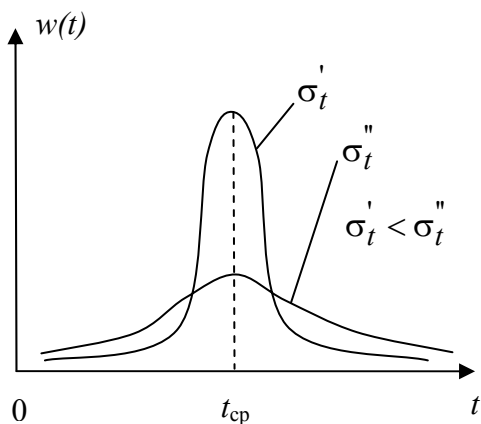


Рис.1.4. Распределение времени до отказа по нормальному закону

значений случайной величины – времени до отказа. Общепринятыми приемами математической статистики для времени до отказа можно построить гистограмму распределения (рис.1.5) и попытаться восстановить вид функции $w(t)$.

Величины w_i^* определяют по формуле

$$w_i^* = \frac{n(\Delta t_i)}{N \cdot \Delta t_i}, \quad (1.4)$$

где N – общее число испытываемых изделий;

$n(\Delta t_i)$ – число изделий, отказавших на интервале времени Δt_i ;

Δt_i – ширина i -го временного интервала.

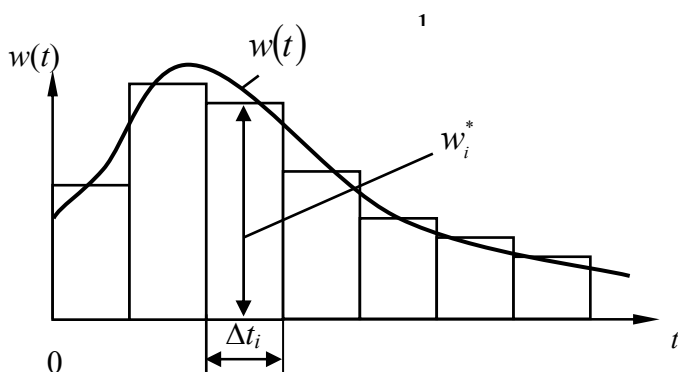


Рис.1.5. Гистограмма распределения времени до отказа

С увеличением количества испытываемых изделий N и уменьшением ширины интервалов Δt_i , гистограмма все более и более приближается к плотности распределения $w(t)$.

Характеристика $w(t)$ на практике не находит широкого применения в качестве показателя надёжности изделий, однако, без знания этой характеристики трудно определить интересующие нас показатели безотказности.

1.7. Показатели надёжности РЭУ и их элементов

Надёжность является комплексным свойством изделия. Для описания различных сторон этого свойства на практике пользуются **показателями надёжности**, представляющими собой количественные характеристики одного или нескольких свойств, определяющих надёжность изделия.

Используют единичные и комплексные показатели надёжности. Под **единичным** понимают такой показатель, который характеризует одно из свойств, составляющих надёжность изделия. **Комплексный** показатель характеризует несколько свойств, составляющих надёжность изделия.

Для количественного описания различных сторон надёжности как свойства обычно используют несколько групп показателей.

Первая группа – показатели безотказности. К основным показателям этой группы относятся:

вероятность безотказной работы $P(t_3)$ в течение заданного времени t_3 ;

вероятность отказа $q(t_3)$ в течение заданного времени t_3 ;

интенсивность отказов λ ;

средняя наработка до отказа (среднее время безотказной работы в случае, если наработка выражается временем) $T_{\text{ср}}$;

средняя наработка на отказ (кратко – наработка на отказ) T_0 ;

параметр потока отказов μ ;

гамма-процентная наработка до отказа T_γ .

Под **интенсивностью отказов** понимают условную плотность времени до отказа изделия, определяемую при условии, что до рассматриваемого момента времени отказ не возник.

Под **параметром потока отказов** понимают отношение математического ожидания числа отказов восстанавливаемого изделия за достаточно малое время работы к значению этого времени.

Под **гамма-процентной наработкой до отказа** понимают наработку, в течение которой отказ в изделии не возникает с вероятностью γ , выраженной в процентах, т.е. эта есть такая минимальная наработка до отказа, которую будут иметь γ процентов изделий данного вида. Например, запись в технической документации: “90-процентная наработка до отказа составляет не менее 250 ч” означает, что у 90% изделий данного вида в течение суммарной наработки, равной 250 ч, отказ не возникнет.

Показатели этой группы, кроме показателя T_0 , используют как для устройств, так и для элементов. Показатель T_0 применяется только для восстанавливаемых устройств. Большинство показателей будут рассмотрены ниже.

Вторая группа – показатели ремонтпригодности. Основными показателями этой группы являются:

вероятность восстановления изделия $v(\tau)$ за заданное время τ ;

среднее время восстановления (математическое ожидание времени восстановления работоспособного состояния изделия после отказа) $T_{\text{в}}$.

Ясно, что показатели данной группы имеют смысл только для восстанавливаемых изделий. Для элементов РЭУ эти показатели не используют, ибо элементы являются, как правило, изделиями невосстанавливаемыми.

Далее показатели этой группы также будут рассмотрены подробно.

Третья группа – показатели долговечности. К ним относятся:

Средний ресурс (математическое ожидание ресурса);

гамма-процентный ресурс;
 средний срок службы (математическое ожидание срока службы);

гамма-процентный срок службы.

Под **ресурсом** понимают суммарную наработку изделия от начала его эксплуатации или ее возобновления после ремонта до перехода в предельное состояние. Под **предельным** понимают состояние изделия, при котором его дальнейшая эксплуатация недопустима или нецелесообразна, либо восстановление его работоспособного состояния невозможно или нецелесообразно. Критерий предельного состояния изделия устанавливается в нормативно-технической или проектной документации. Под **гамма-процентным** понимают ресурс, который обеспечивается с вероятностью γ , выраженной в процентах, т.е. это такой минимальный ресурс, который будут иметь гамма процентов изделий данного вида.

Под **сроком службы** понимают календарную продолжительность от начала эксплуатации изделия или ее возобновления после ремонта до перехода в предельное состояние. **Гамма-процентный срок службы** — это такой срок службы, который обеспечивается с вероятностью γ , выраженной в процентах, т.е. это минимальный срок службы, который будут иметь гамма процентов изделий данного вида.

Показатели этой группы используют как для устройств, так и для элементов.

Четвертая группа — показатели сохраняемости. К ним относят: средний срок сохраняемости (математическое ожидание срока сохраняемости);

гамма-процентный срок сохраняемости.

Под **сроком сохраняемости** понимают календарную продолжительность хранения и (или) транспортирования изделия, в течение которой сохраняются в заданных пределах значения параметров, характеризующих способность изделия выполнять заданные функции. По истечении срока сохраняемости изделие должно соответствовать требованиям безотказности, долговечности и ремонтпригодности, установленным нормативно-технической документацией на изделие.

Гамма-процентный срок сохраняемости — это срок сохраняемости, достигаемый изделием с заданной вероятностью γ , выраженной в процентах, т.е. это такой минимальный срок сохраняемости, который будут иметь гамма процентов изделий данного вида. Показатели этой группы также используют, как для устройств, так и для элементов.

Пятая группа — комплексные показатели надёжности. Показатели этой группы выступают в виде эксплуатационных коэффициентов надёжности, используемых для устройств. Основными коэффициентами являются:

коэффициент готовности;
коэффициент технического использования;
коэффициент простоя.

Подробно эти коэффициенты рассматриваются в разделе 5.14.

Заметим, что в отличие от показателей пятой группы, показатели первых четырех относятся к единичным показателям надёжности.

1.8. Вероятность безотказной работы и вероятность отказа

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

Под вероятностью безотказной работы изделия за время t_3 понимают вероятность вида

$$P(t_3) = \text{Вер}\{T \geq t_3\}, \quad (1.5)$$

где T — случайное время безотказной работы изделия (время до отказа).

Запись «Вер» здесь и далее означает «вероятность».

Причём здесь и далее слова «за время t_3 » означают интервал времени от 0 до t_3 включительно.

Безотказная работа изделия и его отказ — события противоположные, составляющие полную группу событий. Поэтому для вероятности отказа изделия за произвольное время t можно записать:

$$q(t) = 1 - P(t). \quad (1.6)$$

С другой стороны, вероятность отказа можно представить как

$$q(t) = \text{Вер}\{T < t\}. \quad (1.7)$$

Рассматривая выражение (1.7) с учётом определений, вводимых в теории вероятностей, можно прийти к выводу, что

$$q(t) = F(t), \quad (1.8)$$

где $F(t)$ — функция распределения (интегральный закон) времени до отказа, найденная для времени t .

Графики, функций $P(t)$ и $q(t)$ приведены на рис.1.6.

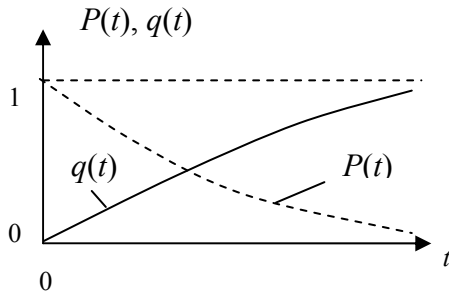


Рис.1.6. Графики функций $P(t)$ и $q(t)$

Зависимость вероятности безотказной работы от времени называют функцией надёжности. Эта функция имеет три очевидные свойства:

1. $P(t = 0) = 1$, т.е. предполагается, что в момент времени $t=0$ изделие работоспособно.

2. $P(t = \infty) = 0$. Это означает, что при длительной эксплуатации изделие обязательно откажет.

3. $P(t)$ — не возрастающая функция. В противном случае мы не нашли бы физического объяснения её возрастанию.

Если известна функция плотности распределения времени безотказной работы $w(t)$, то вероятность безотказной работы изделия за время t_3 может быть определена как

$$P(t_3) = \int_{t_3}^{\infty} w(t) dt, \quad (1.9)$$

а вероятность отказа за время t_3

$$q(t_3) = \int_0^{t_3} w(t) dt. \quad (1.10)$$

Геометрическая интерпретация выражений (1.9) и (1.10) показана на рис 1.7.

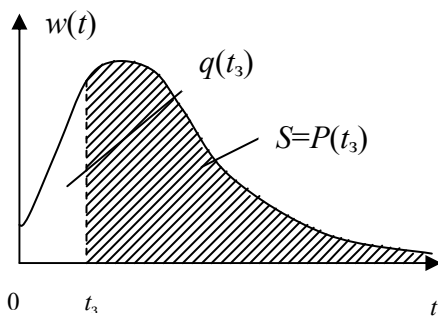


Рис.1.7. К определению вероятности безотказной работы и вероятности отказа

В случае экспоненциального распределения времени безотказной работы, т.е. когда

$$w(t) = \lambda e^{-\lambda t},$$

с использованием выражения (1.9) можно получить

$$P(t) = e^{-\lambda t}. \quad (1.11)$$

Этой формулой широко пользуются в инженерных расчётах. Она также известна под названием **“экспоненциальный закон надёжности”**.

По результатам испытаний вероятность безотказной работы за время t_3 и вероятность отказа за время t_3 можно определить по формулам

$$P(t_3) = \frac{N - n(t_3)}{N}; \quad q(t_3) = \frac{n(t_3)}{N}, \quad (1.12)$$

где N — количество испытываемых изделий;

$n(t_3)$ — количество изделий, отказавших за время t_3 .

Предполагается, что в начальный момент времени все N изделий работоспособны.

Для получения достоверных оценок объем выборки N должен быть достаточно велик [3, 4].

1.9. Интенсивность отказов

Под *интенсивностью отказов элементов* понимают величину, численно равную

$$\lambda_i^* = \frac{n(\Delta t_i)}{N_{\text{ср}i} \cdot \Delta t_i}, \quad (1.13)$$

где $n(\Delta t_i)$ — количество элементов, отказавших в i -м временном интервале;

Δt_i — ширина i -го временного интервала;

$N_{\text{ср}i}$ — среднее количество элементов, исправно работающих в i -м временном интервале.

Значение $N_{\text{ср}i}$ определяют как

$$N_{\text{ср}i} = \frac{N_{i-1} + N_i}{2}$$

где N_{i-1} , N_i — количество изделий, исправно работающих соответственно к началу и концу i -го интервала.

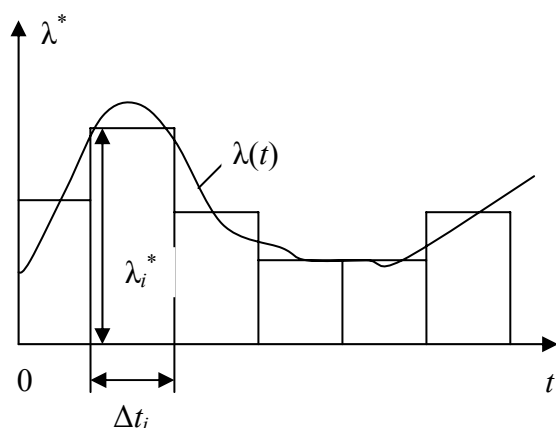


Рис.1.8. Восстановление вида функции $\lambda(t)$

пользуясь выражением

Величина $N_{\text{ср}i}$ может быть как целым, так и дробным числом.

Рассчитанное по формуле (1.13) значение λ_i^* относится к любой точке i -го рассматриваемого интервала.

Для интенсивности отказов может быть построена гистограмма и восстановлен примерный вид функции $\lambda(t)$, (рис.1.8).

Интенсивность отказов устройства можно определить,

$$\lambda_{\text{РЭУ}} = \frac{n}{\Delta t}, \quad (1.14)$$

где Δt – время работы (суммарная наработка) РЭУ за рассматриваемый календарный период;

n – число возникших отказов устройства за время работы Δt .

Предполагается, что после возникновения отказа выполняется восстановление работоспособного состояния устройства.

Если располагают выборкой однотипных РЭУ, то для подсчета интенсивности отказов можно пользоваться также выражением (1.13).

Зависимость интенсивности отказов от времени в технике называется λ -характеристикой. Типичный вид λ -характеристики радиоэлектронных устройств приведен на рис.1.9.

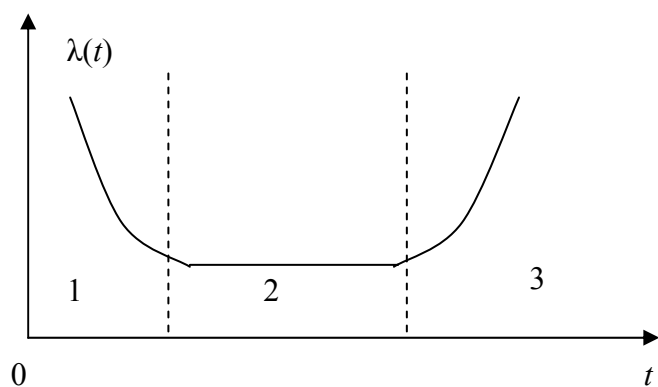


Рис.1.9.Типичный вид λ -характеристики РЭУ

На λ -характеристике можно четко выделить три области.

1. *Период приработки.*

Характеризуется повышенным значением интенсивности отказов (большим числом отказов) из-за грубых дефектов производства. На практике обычно стремятся уйти из этой области, организуя в условиях производства термoeлектротренировку, технологический прогон и т.п. Продолжительность этой области для РЭУ составляет десятки-сотни часов.

2. *Период нормальной эксплуатации.* Характеризуется примерным постоянством во времени интенсивности отказов. Инженерные расчёты надёжности устройств обычно выполняют для этого периода. Продолжительность данного периода составляет тысячи-десятки тысяч часов.

3. *Область старения.* Характеризуется повышенным числом отказов ввиду старения и износа составных частей изделия. Техническая эксплуатация изделия на этом этапе нецелесообразна.

Между характеристиками изделия $w(t)$, $P(t)$ и $\lambda(t)$ существует следующая связь [6]:

$$\lambda(t) = \frac{w(t)}{P(t)} \quad (1.15)$$

1.10. Нарботка на отказ (средняя наработка на отказ)

Предположим, что РЭУ эксплуатируется в течение определенного календарного периода. Возникающие при эксплуатации отказы

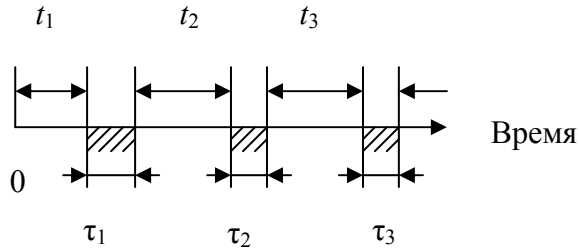


Рис.1.10. Процесс функционирования РЭУ: t_1, t_2, t_3 – интервалы безотказной работы РЭУ; τ_1, τ_2, τ_3 – интервалы по устранению отказов

устраняются, и изделие снова используется по назначению. Этот процесс продолжается до окончания рассматриваемого календарного периода. Изобразим процессы функционирования и устранения отказов РЭУ на временной оси (рис.1.10).

Тогда под наработкой на отказ понимают величину, определяемую как

$$T_0 = \frac{\sum_{i=1}^m t_i}{m}, \quad (1.16)$$

где m — число отказов РЭУ, возникших за рассмотренный календарный период, или, что то же самое, число периодов безотказной работы.

Показатель T_0 имеет смысл только применительно к восстанавливаемым устройствам. Его более полно называют **средней наработкой на отказ**, что понятно из выражения (1.16).

Если поток отказов РЭУ данного типа стационарный, то наработку на отказ T_0 можно определить по нескольким экземплярам, используя формулу

$$T_0 = \frac{\sum_{j=1}^M T_j}{\sum_{j=1}^M m_j}, \quad (1.17)$$

где M — количество экземпляров;

T_j — суммарное время безотказной работы j -го экземпляра;

m_j — количество отказов j -го экземпляра.

Заметим, что в случае экспоненциального распределения времени безотказной работы условие стационарности потока отказов РЭУ, как правило, выполняется [1, 3 и др.]

1.11. Среднее время безотказной работы

Надёжность однотипных устройств или элементов с точки зрения продолжительности их работы до первого отказа можно оценить **средним временем безотказной работы**, под которым понимают математическое ожидание времени безотказной работы. В общем случае рассматриваемый показатель называют **средней наработкой до отказа**, так как он представляет собой математическое ожидание (среднее значение) случайной величины — наработки до отказа.

Этот показатель используют как для устройств, так и для элементов. Предположим, что на испытание поставлено N изделий, и в процессе испытаний фиксируются интервалы безотказной работы каждого изделия. Тогда среднее время безотказной работы $T_{\text{ср}}$ может быть определено как

$$T_{\text{ср}} = \frac{\sum_{i=1}^N T_i}{N}, \quad (1.18)$$

где T_i — время безотказной работы i -го экземпляра рассматриваемого вида изделия.

Чем больше N , тем выше точность оценки величины $T_{\text{ср}}$.

В инженерной практике испытания изделий выполняются в течение ограниченного промежутка времени, и не представляется возможным дождаться отказа всех изделий. В этом случае значение $T_{\text{ср}}$ для неотказавших экземпляров, из числа испытываемых, полагают равным времени испытаний. Естественно, оценка $T_{\text{ср}}$ оказывается заниженной, но с этим приходится мириться.

Показатели T_0 и $T_{\text{ср}}$ по своей физической сущности различны, однако в случае экспоненциального закона надёжности они совпадают по значению.

Можно показать, что величина $T_{\text{ср}}$ определяется формулой

$$T_{\text{ср}} = \int_0^{\infty} P(t) dt, \quad (1.19)$$

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

В случае экспоненциального распределения времени до отказа показатель $T_{\text{ср}}$ и совпадающий с ним по значению показатель T_0 соответствуют примерно 37%-ой наработке до отказа ($\gamma \approx 37\%$). Это означает, что примерно 37% изделий данного вида проработают без отказа в течении времени $T_{\text{ср}}$. Хотя из числа неотказавших изделий некоторые могут проработать значительно больше времени.

Доказательство сформулированного вывода таково.

При экспоненциальном распределении времени до отказа вероятность безотказной работы за время t определяется как

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

С учётом того, что $\lambda = 1/T_0$, получим

$$P(t) = e^{-\lambda t} = e^{-\frac{t}{T_0}} = \left|_{t=T_0}^{\text{примем}} \right| = e^{-1} \approx 0,37.$$

Можно также показать, что для гамма-процентной наработки до отказа справедливы соотношения:

$$T_{\gamma=90\%} \approx 0,1 T_{\text{ср}}; \quad T_{\gamma=99\%} \approx 0,01 T_{\text{ср}}.$$

1.12. Параметр потока отказов

Напомним, что под параметром потока отказов понимают отношение математического ожидания числа отказов восстанавливаемого устройства за достаточно малое время к значению этого времени.

Параметр потока отказов μ для момента времени t определяют по формуле

$$\mu(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{M[n(t + \Delta t) - n(t)]}{\Delta t}, \quad (1.20)$$

где Δt — малый отрезок времени работы устройства;

$n(t)$ — количество отказов РЭУ, наступивших от начального момента времени до значения t .

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

Статистическую оценку параметра потока отказов $\mu(t)$ можно определить по формуле

$$\mu^*(t) = \frac{n(t_2) - n(t_1)}{t_2 - t_1}, \quad (1.21)$$

где $[t_1, t_2]$ — конечный отрезок времени, причём, $t_1 \leq t \leq t_2$.

1.13. Среднее время восстановления и вероятность восстановления

Под *средним временем восстановления* понимают математическое ожидание времени восстановления работоспособного состояния РЭУ после отказа.

Среднее время восстановления можно определить по аналогии с показателем T_0 (см. подразд.1.10).

Пусть за определенный календарный период эксплуатации РЭУ произошло m отказов. На восстановление РЭУ после возникновения i -го отказа затрачивалось время τ_i (см. рис.1.10). Тогда среднее время восстановления РЭУ может быть подсчитано как

$$T_B = \frac{\sum_{i=1}^m \tau_i}{m}. \quad (1.22)$$

Значение T_B показывает, сколько в среднем затрачивается времени на обнаружение и устранение одного отказа, и характеризует ремонтпригодность РЭУ.

Под **вероятностью восстановления** за заданное время τ_3 понимают вероятность вида

$$v(\tau_3) = \text{Вер}\{T \leq \tau_3\}, \quad (1.23)$$

где T — случайное время восстановления изделия.

Формулы для подсчета значений вероятности $v(\tau_3)$ зависят от закона распределения времени восстановления. Вероятность восстановления может быть определена как

$$v(\tau_3) = \int_0^{\tau_3} w(\tau) d\tau. \quad (1.24)$$

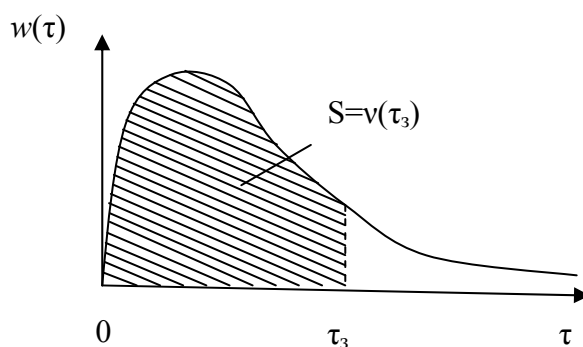


Рис. 1.11. К вопросу об определении величины $v(\tau_3)$

Графическую интерпретацию выражения (1.24) можно понять из рис.1.11.

1.14. Эксплуатационные коэффициенты надёжности

Эксплуатационные коэффициенты надёжности относятся к комплексным показателям надёжности, т.е. показателям, характеризующим несколько свойств, составляющих надёжность РЭУ.

Под **коэффициентом готовности** K_{Γ} понимают вероятность того, что РЭУ окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени, кроме планируемых периодов, в течение которых применение РЭУ по назначению не предусматривается.

Количественно коэффициент готовности можно подсчитать по формуле

$$K_{\Gamma} = \frac{\sum_{i=1}^m t_i}{\sum_{i=1}^m t_i + \sum_{i=1}^m \tau_i}. \quad (1.25)$$

где t_i – время безотказной работы между $(i-1)$ и i -м отказом (см. рис. 1.10);

τ_i – время восстановления i -го отказа (см. рис. 1.10);

m – количество отказов за рассматриваемый период.

Разделив числитель и знаменатель приведенной формулы на m и воспользовавшись формулами (1.16) и (1.22), получим

$$K_{\Gamma} = \frac{T_0}{T_0 + T_{\text{в}}}. \quad (1.26)$$

Физически коэффициент K_{Γ} показывает средний процент РЭУ данного вида, находящихся в работоспособном состоянии в любой момент времени.

Под **коэффициентом технического использования** $K_{\text{и}}$ понимают отношение математического ожидания суммарного времени пребывания объекта в работоспособном состоянии за некоторый период эксплуатации к математическому ожиданию суммарного времени пребывания РЭУ в работоспособном состоянии и простоев, обусловленных техническим обслуживанием и ремонтом за этот же период.

Количественно коэффициент $K_{\text{и}}$ может быть подсчитан по формуле

$$K_{\text{и}} = \frac{\sum_{i=1}^m t_i}{\sum_{i=1}^m t_i + \sum_{i=1}^m t_{\text{п}i}}. \quad (1.27)$$

где $t_{\text{п}i}$ – время вынужденного простоя после i -го отказа.

В суммарное время вынужденного простоя в общем случае включается время на обнаружение и устранение отказов, регулировку и настройку РЭУ, время простоя из-за отсутствия запасных элементов и время на проведение профилактических работ.

Физически коэффициент $K_{\text{и}}$ характеризует долю времени нахождения РЭУ в работоспособном состоянии относительно общей продолжительности эксплуатации.

Коэффициент простоя $K_{\text{п}}$ характеризует расход времени на различные непроизводительные затраты и определяется как отношение суммарного времени вынужденных простоев к общему времени безотказной работы и вынужденных простоев за этот же период эксплуатации:

$$K_{\text{и}} = \frac{\sum_{i=1}^m t_{\text{п}i}}{\sum_{i=1}^m t_i + \sum_{i=1}^m t_{\text{п}i}}. \quad (1.28)$$

В общем случае в суммарное время простоя входят все непроизводительные затраты времени, исключая время хранения и нахождения в резерве.

Можно показать, что между коэффициентами $K_{\text{и}}$ и $K_{\text{п}}$ имеет место связь

$$K_{\text{и}} = 1 - K_{\text{п}}.$$

Если в качестве суммарных непроизводительных затрат взять только время на восстановление РЭУ после отказов, то получим коэффициент, характеризующий степень необходимости ремонта. Можно показать, что этот коэффициент $K_{\text{р}}$ связан с коэффициентом готовности $K_{\text{г}}$ выражением

$$K_{\text{р}} = 1 - K_{\text{г}}.$$

В литературе [7] коэффициент $K_{\text{р}}$ назван коэффициентом ремонтпригодности, что является не совсем удачным, так как большему значению коэффициента $K_{\text{р}}$ соответствует худший уровень ремонтпригодности.

1.15. Показатели долговечности

О долговечности, как составляющей надёжности и свойстве изделий судят с помощью таких показателей как **ресурс** и **срок службы**.

Под **ресурсом** понимают суммарную наработку изделия от начала эксплуатации до перехода в предельное состояние при необходимости с перерывами для технического обслуживания и ремонта.

Под **предельным состоянием** понимают такое состояние изделия, при котором его дальнейшая эксплуатация или ремонт невозможны либо нецелесообразны по техническим, экономическим и другим соображениям.

В технической документации на устройство обычно указывают, что понимают под предельным состоянием. Как правило, для одного и того же изделия указывают несколько критериев наступления предельного состояния. И если сработал хотя бы один критерий, то для изделия уже имеет место предельное состояние.

Под **сроком службы** понимается не суммарная наработка, а календарная продолжительность от начала эксплуатации изделия до перехода в предельное состояние.

Для получения информации о ресурсе и сроке службы изделия на практике используют количественные показатели, собирательно называемые **показателями долговечности** (табл. 1.4)

Таблица 1.4

Показатели долговечности	
Показатели, описывающие ресурс	Показатели, описывающие срок службы
1. $t_{\text{cp}}^{(\text{рес})}$ – средний ресурс	1. $t_{\text{cp}}^{(\text{ср.сл})}$ – средний срок службы
2. $t_{\gamma}^{(\text{рес})}$ – гамма-процентный ресурс	2. $t_{\gamma}^{(\text{ср.сл})}$ – гамма-процентный срок службы

Запись в технической документации: «95- процентный ресурс составляет не менее 3000 ч» означает, что при эксплуатации для 95% изделий данного типа по истечении суммарной наработки 3000 ч предельное состояние ещё не наступит. А запись: «95- процентный срок службы составляет не менее 5 лет» означает, что по истечении 5 лет предельное состояние для 95% изделий ещё не наступит.

Эксплуатационно-техническими показателями, связанными с долговечностью изделий, являются следующие:

- $t_{\text{н}}^{(\text{рес})}$ – назначенный ресурс;
- $t_{\text{у}}^{(\text{рес})}$ – установленный ресурс.
- $t_{\text{н}}^{(\text{ср.сл})}$ – назначенный срок службы;
- $t_{\text{у}}^{(\text{ср.сл})}$ – установленный срок службы.

Под понятием **назначенный ресурс (срок службы)** понимают такое значение ресурса (срока службы), при достижении которого изделие снимается с эксплуатации независимо от его технического

состояния. Эти показатели обычно используют для ответственных устройств, например электронных устройств военной техники.

Под понятием *установленный ресурс (срок службы)* понимают такое значение ресурса (срока службы), который гарантируется с вероятностью $\gamma=100\%$. Указанные показатели имеют физический смысл и используются только для устройств, причём для восстанавливаемых.

Раздел 2. НАДЁЖНОСТЬ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗДЕЛИЙ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ И ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

2.1. Интенсивность отказов как основная характеристика надёжности элементов

При расчёте показателей надёжности устройств надо располагать данными о показателях надёжности элементов.

Основной характеристикой надёжности элементов, приводимой в справочниках (технических условиях и других нормативно-технических документах), является интенсивность отказов. Выбор этой характеристики в качестве основной объясняется следующим.

Экспериментально было установлено, что время до отказа элементов хорошо описывается экспоненциальной моделью

$$w(t) = \lambda e^{-\lambda t},$$

где λ – параметр экспоненциальной модели.

Как отмечалось выше, в случае экспоненциальной модели вероятность безотказной работы за время t определяется выражением

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

Ранее также отмечалось, что величины $w(t)$, $P(t)$ и $\lambda(t)$ связаны соотношением

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

Тогда в случае экспоненциального распределения времени безотказной работы получим

$$\lambda(t) = \frac{\lambda e^{-\lambda t}}{e^{-\lambda t}} = \lambda = \text{const}. \quad (2.1)$$

Из выражения (2.1) видно, что при экспоненциальном распределении времени до отказа интенсивность отказов постоянна и численно равна параметру λ экспоненциального распределения. Поэтому интенсивность отказов и параметр экспоненциального распределения обозначены одной и той же буквой – λ . Таким образом, стало возможным в справочниках задать надёжность элементов одним числом – значением интенсивности отказов λ .

Интенсивность отказов элементов определяют обычно опытным путём для нормального электрического режима работы элементов при нормальных условиях эксплуатации (лабораторных условиях). При этом в инженерной практике часто пользуются планом испытаний типа $[N, V, T]$. Этот план означает, что испытывается N элементов, фиксируются отказы V , а испытания проводятся в течение времени T . Оценку интенсивности отказов дают в этом случае с помощью формулы [1]

$$\lambda^* = \frac{V}{\sum_{i=1}^V t_i + (N - V)T}. \quad (2.2)$$

где t_i — время до отказа i -го элемента из числа отказавших;

V — количество отказавших элементов.

Чтобы не совершить большую ошибку при определении λ^* , значение V должно быть не менее 5-10.

Знаменатель формулы (2.2), примерно равный $N \cdot T$, называют количеством отработанных приборо-часов (элементо-часов).

Нетрудно установить, что для того, чтобы подтвердить экспериментально значение $\lambda = 10^{-7}$ 1/ч, значение величины $N \cdot T$ должно быть равным 10^8 , так как при испытаниях элементов желательно иметь хотя бы десять отказов. Предположим, что $N = 1000$, тогда $T = 100000$ ч, что составляет более десяти лет. Поэтому на практике используют ускоренные (обычно форсированные) испытания, позволяющие получить ту же информацию о надёжности, но за более короткий срок. Ускорение испытаний может достигать 50... 100 и даже более единиц.

В настоящее время для высоконадёжных видов элементов при определении значений величины λ используют расчёт и прогнозирование, принимая при этом во внимание структурную сложность нового типа элемента и данные из опыта эксплуатации аналогичных элементов.

Интенсивность отказов современных элементов занимает примерно диапазон $10^{-10} \dots 10^{-5}$ 1/ч (прил.1).

Размерность интенсивности отказов $[\lambda] = 1/\text{ч} = \text{ч}^{-1}$.

За рубежом в качестве размерности величины λ используют также процент на 1000 ч работы, что равносильно введению множителя 10^5 . В последние годы для высоконадёжных элементов начали в качестве размерности интенсивности отказов использовать **фит.**

$$1 \text{ фит} = 10^{-9} \text{ 1/ч.}$$

2.2. Коэффициенты электрической нагрузки элементов

Замечено, что надёжность элементов зависит от коэффициентов электрической нагрузки, характеризующих степень электрической нагруженности элементов относительно их номинальных или предельных возможностей, указываемых в ТУ.

Количественно коэффициенты электрической нагрузки (часто говорят: коэффициент нагрузки) определяют по соотношению

$$K_{\text{н}} = \frac{F_{\text{раб}}}{F_{\text{ном}}}. \quad (2.3)$$

где $F_{\text{раб}}$ – электрическая нагрузка элемента в рабочем режиме, то есть нагрузка, которая имеет место на рассматриваемом схемном элементе;

$F_{\text{ном}}$ – номинальная или предельная по ТУ электрическая нагрузка элемента, выполняющего в конструкции функцию схемного элемента.

В качестве нагрузки F выбирают такую электрическую характеристику элемента (одну или несколько), которая в наибольшей степени влияет на его надёжность. Например, для резисторов в качестве характеристики F берут мощность рассеивания, для конденсаторов – напряжение, прикладываемое к обкладкам.

Пример 2.1. В коллекторную цепь транзистора (рис.2.1) предполагается поставить резистор типа МЛТ со значением сопротивления $1\text{кОм} \pm 10\%$ и номинальной мощностью рассеивания $0,5\text{Вт}$.

Ток, протекающий в коллекторной цепи транзистора $I_{\text{к}}$, равен 10мА . Требуется определить, какое значение коэффициента нагрузки будет иметь место для выбираемого резистора.

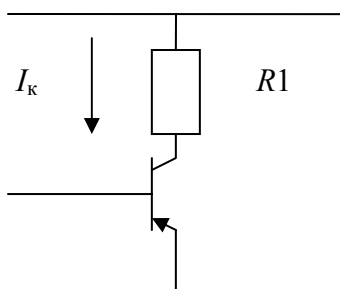


Рис. 2.1. К расчёту коэффициента нагрузки резистора

Решение. Как отмечалось, для резисторов в качестве характеристики F в формуле (2.3) используют мощность рассеивания. Тогда для коэффициента нагрузки резистора

$$K_{\text{н}} = \frac{F_{\text{раб}}}{F_{\text{ном}}}.$$

По условию примера $R1=1\text{кОм}\pm 10\%$, то есть может иметь место отклонение сопротивления резистора от номинального значения в пределах заданного производственного (технологического) допуска. Определим значение коэффициента нагрузки для номинального значения сопротивления резистора, равного 1кОм .

Из условий примера имеем $P_{\text{ном}}=0,5\text{ Вт}$.

Определим значение $P_{\text{раб}}$, то есть то значение мощности рассеивания, которое будет иметь место на схемном элементе $R1$ (см. рис.2.1). Применительно к рассматриваемому примеру

$$P_{\text{раб}} = I_{\text{к}}^2 R1 = \left| \begin{array}{l} I_{\text{к}} = 10\text{мА} = 10 \cdot 10^{-3}\text{ А} \\ R1 = 1\text{кОм} = 10^3\text{ Ом} \end{array} \right| = (10 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 10^3 = 0,1\text{Вт}.$$

Тогда значение коэффициента нагрузки определится как

$$K_{\text{н}} = \frac{F_{\text{раб}}}{F_{\text{ном}}} = \frac{0,1}{0,5} = 0,2.$$

То есть в данном случае резистор будет нагружен на 20% от номинальных возможностей, что в условиях эксплуатации повысит его реальный уровень надёжности.

2.3. Формулы для определения коэффициентов электрической нагрузки некоторых элементов

На практике при определении коэффициентов электрической нагрузки конкретного элемента выбирают такую электрическую характеристику (одну или несколько), которая в наибольшей степени влияет на надёжность этого элемента. Формулы, которыми можно пользоваться для определения коэффициентов электрической нагрузки основных элементов РЭУ, приведены в табл.2.1.

Таблица 2.1

Формулы для определения коэффициентов электрической нагрузки элементов

Элемент	Формула для определения $K_{\text{н}}$	Пояснения
Резистор	$K_{\text{н}}=P_{\text{раб}}/P_{\text{ном}}$	P — мощность
Конденсатор	$K_{\text{н}}=U_{\text{раб}}/U_{\text{ном}}$	U — напряжение

Продолжение табл. 2.1

Элемент	Формула для определения K_n	Пояснения
Транзистор биполярный (полевой)	$K_n^{(I)} = I_{к.раб} / I_{к.мах};$ $K_n^{(U)} = U_{к.раб} / U_{к.мах};$ $K_n^{(P)} = P_{к.раб} / P_{к.мах}$	I_k — ток, U_k — напряжение, P_k — мощность, рассеиваемая на коллекторе (стоке)
Диод выпрямительный и импульсный	$K_n^{(I)} = I_{раб} / I_{махТУ};$ $K_n^{(U)} = U_{обр.раб} / U_{обр.махТУ}$	$U_{обр}$ — обратное напряжение
Цифровые интегральные микросхемы (ИМС)	$K_n^{(I)} = I_{вых.раб} / I_{вых.мах};$ при $U_{пит} = U_{пит.ном}$	$I_{вых}$ — выходной ток ИМС $U_{пит}$ — напряжение источника питания
Аналоговые (линейно импульсные) ИМС	$K_n^{(I)} = I_{вых.раб} / I_{вых.мах};$ $K_n^{(P)} = P_{раб} / P_{ном};$ при $U_{пит} = U_{пит.ном}$	$I_{вых}$ — выходной ток ИМС P — рассеиваемая мощность
Элементы коммутации низковольтные ($U < 300$ В)	$K_n = I_{раб} / I_{ном}$	I — ток через контакт

Для транзисторов, диодов и аналоговых ИМС в качестве определяющего параметра выбирается тот, для которого $K_n \geq 0,01 \dots 0,05$. Для транзисторов при значениях $K_n^{(I)} > 0,05$ и $K_n^{(U)} > 0,05$ в качестве определяющего параметра используется мощность, рассеиваемая на коллекторе (для полевых транзисторов – на стоке).

2.4. Краткая характеристика надёжности элементов

Интегральные микросхемы (ИМС). Относятся к классу надёжных элементов. При прочих равных условиях гибридные ИМС менее надёжны по сравнению с полупроводниковыми из-за наличия в них паяных соединений и навесных компонентов.

В общем случае цифровые ИМС надёжнее аналоговых (линейно-импульсных). Объясняется это режимом переключения, в котором работают цифровые ИМС.

Надёжность ИМС слабо зависит от степени интеграции, то есть от числа элементов в ИМС. Объясняется это тем, что значительный

вклад в ненадёжность ИМС вносят корпус и межсоединения, а такие имеют, как правило, все ИМС.

Полупроводниковые приборы. Замечено, что примерно 80% отказов полупроводниковых приборов являются постепенными, т.е. отказами в виде постепенного и монотонного ухода параметров за пределы норм, указанных в технической документации.

В общем случае мощные полупроводниковые приборы менее надежны. Это объясняется влиянием тепловой нагрузки на кристалл. Установлено, что надёжность мощных полупроводниковых приборов во многом зависит от качества припайки кристалла к корпусу.

Надёжность полупроводниковых приборов также зависит от вида технологии изготовления самого прибора, а кроме того – от электрического режима работы (усилительный или ключевой режим).

Резисторы. Относятся к классу высоконадежных элементов (исключая переменные и подстроечные резисторы).

В общем случае резисторы объёмного сопротивления надежнее плёночных, однако последние более стабильны. Замечено, что надёжность резистора зависит от характера протекающего тока, а также от номинального значения сопротивления. Высокоомные резисторы менее надежны.

Надёжность переменных и подстроечных резисторов во многом зависит от качества скользящего контакта.

Конденсаторы. Относятся к классу одних из самых высоконадежных элементов, исключая электролитические конденсаторы.

Замечено, что надёжность конденсаторов зависит от их места в электрической схеме (разделительный, блокировочный, контурный или накопительный). Экспериментально установлено, что для конденсаторов справедлив закон "десяти градусов". Суть закона: долговечность конденсаторов уменьшается примерно в два раза на каждые 10 градусов повышения температуры.

Элементы коммутации. Относятся к классу самых ненадежных элементов из-за наличия механических контактов.

В справочниках интенсивность отказов для элементов коммутации задается иначе, нежели для элементов, рассмотренных выше, а именно:

для тумблеров, кнопок, реле и т.п. – значением λ , приходящимся на один контакт при номинальном токе через контакт;

для переключателей – значением λ , приходящимся на одну контактную группу при номинальном токе через контакты;

для соединителей (разъемов) – значением λ , приходящимся на один штырь разъёма при номинальном токе через штырь;

для монтажных и соединительных проводов, кабелей – значением λ , приходящимся на каждый метр длины при номинальной плотности тока в проводе.

2.5. Учет влияния на надёжность элементов электрического режима и условий работы

Справочные значения интенсивностей отказов элементов соответствуют коэффициентам нагрузки $K_n = 1$ и нормальным (лабораторным) условиям эксплуатации. На практике с целью повышения надёжности РЭУ коэффициенты нагрузки элементов выбирают меньше единицы, а условия эксплуатации элементов оказываются более жесткими, нежели нормальные. Поэтому возникает задача пересчёта справочных значений интенсивностей отказов на конкретный электрический режим и условия эксплуатации.

В общем случае для пересчёта пользуются выражением

$$\lambda(v) = \lambda_0 \cdot y(x_1, \dots, x_m),$$

- где $\lambda(v)$ — значение интенсивности отказов с учётом электрического режима и условий эксплуатации (символ v подчеркивает это);
- λ_0 — справочное значение интенсивности отказов;
- $y(x_1, \dots, x_m)$ — пересчётная функция;
- x_1, \dots, x_m — факторы, принимаемые во внимание (коэффициент нагрузки, параметры окружающей среды и т.д.);
- m — количество факторов.

В настоящее время для пересчётной функции наиболее часто попользуют выражение (модель) вида

$$y(x_1, \dots, x_m) = \prod_{i=1}^m \alpha(x_i), \quad (2.4)$$

где $\alpha(x_i)$ — поправочный коэффициент, учитывающий влияние фактора x_i .

В качестве факторов x_i могут рассматриваться коэффициент нагрузки, температура, давление, характер электрического режима, номинальное значение параметра элемента и т.д.

В инженерной практике часто учитывают влияние двух важнейших факторов — коэффициента электрической нагрузки и температуры. Для определения произведения поправочных коэффициентов для этого случая можно пользоваться номограммами (семейством кривых), построенными для различных видов элементов по результатам экспериментальных исследований (прил.2). Вид этих номограмм показан на рис. 2.2.

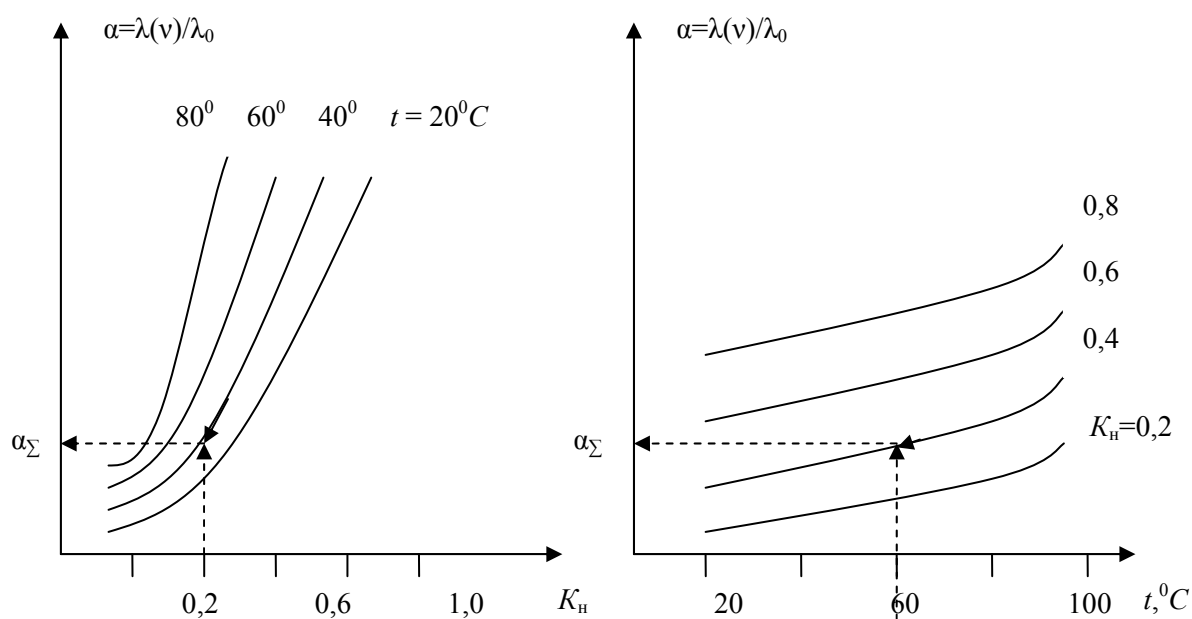


Рис. 2.2. Номограммы для определения произведения поправочных коэффициентов в случае учёта двух факторов – коэффициента нагрузки и температуры

Общий (иногда говорят суммарный) поправочный коэффициент в этом случае есть произведение двух коэффициентов, т.е.

$$\alpha_{\Sigma} = \alpha(K_n) \cdot \alpha(t^{\circ}),$$

где $\alpha(K_n)$ – поправочный коэффициент, учитывающий влияние коэффициента нагрузки;

$\alpha(t^{\circ})$ – поправочный коэффициент, учитывающий влияние температуры.

На рис.2.2 показано, как воспользоваться номограммой в случае, когда $K_n = 0,4$; $t^{\circ} = 60^{\circ}\text{C}$.

В инженерной практике для учёта влияния на надёжность элементов только коэффициента электрической нагрузки K_n можно пользоваться примерным соотношением

$$\lambda(v) \approx K_n^b \cdot \lambda_0, \quad (2.5)$$

где b – показатель степени, зависящий от вида и типа элемента ($b \approx 3...5$ для конденсаторов; $b \approx 1...2$ – для других элементов).

Например, если справочное значение интенсивности отказов для кремниевого транзистора типа КТ201 составляет $\lambda_0 = 0,75 \cdot 10^{-6}$ 1/ч, то при коэффициенте нагрузки этого транзистора $K_n = 0,4$ получим, приняв $b=1$,

$$\lambda(v) \approx 0,4 \cdot 0,75 \cdot 10^{-6} = 3 \cdot 10^{-7} \text{ 1/ч.}$$

Раздел 3. ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЁЖНОСТИ ПРОЕКТИРУЕМЫХ УСТРОЙСТВ

3.1. Оценка показателей надёжности проектируемых РЭУ (основные расчётные соотношения)

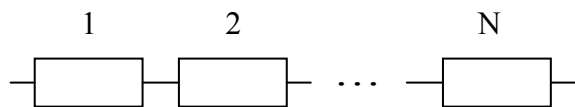


Рис.3.1. Последовательное соединение элементов в РЭУ (N – количество элементов)

Эти соотношения получают в предположении, что элементы в РЭУ с точки зрения надёжности соединены последовательно (рис.3.1). Кроме того, отказы элементов считаются случайными и независимыми друг от друга. Тогда с учётом принятых допущений методами теории вероятностей для вероятности безотказной работы

устройства за время t_3 можно получить следующее выражение:

$$P_{\Sigma}(t_3) = p_1(t_3) \cdot p_2(t_3) \dots p_N(t_3) = \prod_{i=1}^N p_i(t_3), \quad (3.1)$$

где $p_i(t_3)$ — вероятности безотказной работы элементов, подсчитанные для заданного времени t_3 , $i = 1, \dots, N$.

Из выражения (3.1) видно, что для определения показателя надёжности устройства необходимо располагать данными о надёжности элементов, входящих в устройство.

В случае экспоненциального закона надёжности элементов

$$p_i(t_3) = e^{-\lambda_i t_3}, \quad (3.2)$$

где λ_i — параметр экспоненциального распределения для i -го элемента, численно равный интенсивности его отказов.

Подставляя выражения вида (3.2) в соотношение (3.1), получим

$$P_{\Sigma}(t_3) = e^{-\lambda_1 t_3} \cdot e^{-\lambda_2 t_3} \dots e^{-\lambda_N t_3} = e^{-t_3 \sum_{i=1}^N \lambda_i}. \quad (3.3)$$

Из выражения (3.3) следует, что вероятность безотказной работы устройства может быть определена с использованием значений интенсивностей отказов элементов.

В выражении (3.3) величину

$$\lambda_{\Sigma} = \sum_{i=1}^N \lambda_i$$

называют суммарной интенсивностью отказов элементов устройства.

Из него видно, что чем больше значение λ_{Σ} , тем ниже уровень надёжности устройства.

Выражение вида (3.1) называют основным расчётным для вероятности безотказной работы устройств. Выражение (3.3) – аналог выражения (3.1) применительно к экспоненциальному закону надёжности элементов.

Для среднего времени восстановления радиоэлектронного устройства может быть получено выражение

$$T_{\text{в}} = \frac{\sum_{i=1}^N q_i \tau_i}{\sum_{i=1}^N q_i}, \quad (3.4)$$

где q_i — вероятность отказа i -го элемента, подсчитанная для интервала времени t_3 ;

τ_i — среднее время восстановления i -го элемента (значения этих величин можно найти в справочниках для различных видов элементов и классов аппаратуры, прил.4).

Если произведение $\lambda_i \cdot t_3 \ll 1$, что обычно имеет место на практике, то последняя формула может быть представлена в виде

$$T_{\text{в}} = \left| \begin{array}{l} \text{при } \lambda_i \cdot t_3 \ll 1 \\ q_i = q_i(t_3) \approx \lambda_i \cdot t_3 \end{array} \right| \approx \frac{t_3 \sum_{i=1}^N \lambda_i \tau_i}{t_3 \sum_{i=1}^N \lambda_i} = \frac{\sum_{i=1}^N \lambda_i \tau_i}{\sum_{i=1}^N \lambda_i}. \quad (3.5)$$

Выражение (3.5) является основным расчётным соотношением для определения среднего времени восстановления РЭУ.

3.2. Ориентировочный (приближенный) расчёт показателей надёжности проектируемых РЭУ

Существующие методы расчёта показателей надёжности РЭУ различаются степенью точности учёта электрического режима и условий эксплуатации элементов.

При ориентировочном расчёте этот учёт выполняется приближенно, с помощью обобщённых эксплуатационных коэффициентов. Значения этих коэффициентов зависят от вида РЭУ и условий их эксплуатации.

Ориентировочный расчёт выполняется на начальных стадиях проектирования РЭУ, когда ещё не выбраны типы и эксплуатационные характеристики элементов, не спроектирована конструкция и, естественно, отсутствуют результаты конструкторских расчётов (теплового режима, виброзащищённости и т.п.).

Исходными данными при ориентировочном расчёте являются: электрическая схема РЭУ (принципиальная, а для цифровых РЭУ в ряде случаев функциональная), заданное время работы t_3 , условия эксплуатации или вид РЭУ.

Ориентировочный расчёт выполняют для периода нормальной эксплуатации РЭУ, т.е. для периода, когда общая интенсивность отказа устройства примерно постоянна во времени. В этом случае для определения интенсивности отказов РЭУ пользуются значениями интенсивностей отказов элементов. Общая интенсивность отказов РЭУ определяется путем простого суммирования последних.

При ориентировочном расчёте пользуются следующими допущениями (предпосылками):

- а) отказы элементов случайны и независимы;
- б) для элементов РЭУ справедлив экспоненциальный закон надёжности;
- в) принимаются во внимание только внезапные отказы, т.е. вероятность с точки зрения отсутствия постепенных отказов равна единице;
- г) учитываются только элементы электрической схемы, а также монтажные соединения, если вид соединений заранее определен;
- д) учёт электрического режима и условий эксплуатации элементов выполняется приближенно.

Последовательность ориентировочного расчёта:

1. На основе анализа электрической схемы РЭУ формируются группы однотипных элементов.

Признаком объединения элементов в одну группу является функциональное назначение элемента и, в определенной степени, эксплуатационная электрическая характеристика. Например, мало-мощные транзисторы объединяют в одну группу, мощные – в другую и т.д.

Монтажные соединения составляют отдельную группу. Если вид монтажа (печатный, объёмный) определён заранее, то отдельную группу составляют также несущие конструкции (печатная плата и т.д.). Отдельную группу составляют также точки паяк (в дальнейшем – пайки).

2. Для элементов каждой группы по справочникам (ТУ, каталогам и т.п.) определяют среднегрупповое значение интенсивности отказов. Если группу образуют элементы одного типа, то необходимость усреднять значения интенсивностей отказов отпадает.

3. Подсчитывают значение суммарной интенсивности отказов элементов устройства, используя выражение

$$\lambda_{\Sigma} = \sum_{j=1}^k \lambda_{0j} \cdot n_j, \quad (3.6)$$

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

n_j – количество элементов в j -й группе, $j = 1, \dots, k$;

k – число сформированных групп однотипных элементов.

4. С использованием обобщённого эксплуатационного коэффициента выполняют приближённый учёт электрического режима и условий эксплуатации элементов.

Суммарную интенсивность отказов элементов РЭУ с учётом электрического режима и условий работы определяют как

$$\lambda_{\Sigma}(\nu) = \lambda_{\Sigma} \cdot K_{\nu} = K_{\nu} \cdot \sum_{j=1}^k \lambda_{0j} \cdot n_j, \quad (3.7)$$

где K_{ν} – обобщённый эксплуатационный коэффициент, выбираемый по таблицам в зависимости от вида РЭУ или условий его эксплуатации (табл. 3.1).

Таблица 3.1

Значения обобщенного эксплуатационного коэффициента K_{ν} [8]

Вид РЭУ, условия эксплуатации	Значение K_{ν}
Лабораторные условия	1,0
Помещения с регулируемой температурой и влажностью	1,1
Космос (на орбите)	1,5
Наземные стационарные условия	2...4,7 (2,5)
Наземные возимые РЭУ	4...7 (5,0)
Наземные подвижные (переносимые) РЭУ	7...15 (7,0)
Морские защищенные условия	7...12 (7,6)
Морские незащищенные условия	7...15 (10,0)
Бортовые самолетные РЭУ	5...10 (7,0)
Запуск ракеты	10...44 (20,0)

В скобках в табл.3.1 указаны значения, рекомендуемые для использования в расчётах.

5. С использованием гипотезы об экспоненциальном законе надёжности подсчитывают другие показатели надёжности.

Наработка на отказ

$$T_o = \frac{1}{\lambda_{\Sigma}(v)}. \quad (3.8)$$

Вероятность безотказной работы за заданное время t_3

$$P_{\Sigma}(t_3) = e^{-t_3 \cdot \lambda_{\Sigma}(v)} = e^{-\frac{t_3}{T_o}}. \quad (3.9)$$

Среднее время безотказной работы устройства (средняя наработка до отказа)

$$T_{cp} = T_o.$$

Гамма-процентная наработка до отказа T_{γ} определяется, как решение уравнения

$$P(T_{\gamma}) = \frac{\gamma}{100}.$$

В случае экспоненциального распределения времени до отказа

$$T_{\gamma} = -\frac{\ln\left(\frac{\gamma}{100}\right)}{\lambda_{\Sigma}(v)} = -T_o \ln\left(\frac{\gamma}{100}\right). \quad (3.10)$$

3.3. Расчёт показателей надёжности проектируемых РЭУ с учётом коэффициентов электрической нагрузки и условий работы элементов в составе устройств

Этот расчёт, называемый также уточнённым расчётом показателей надёжности, выполняют на заключительных стадиях проектирования РЭУ, когда выбраны типы и типоразмеры элементов, спроектирована конструкция и имеются результаты расчёта тепловых режимов, виброзащищённости и т.п. Напомним, что типоразмер элемента определяется основной электрической эксплуатационной ха-

рактической характеристикой элемента (например, для резисторов – мощностью рассеивания, для конденсаторов – допустимым напряжением).

Расчёт выполняется при тех же допущениях, что и ориентировочный. Однако электрический режим и условия эксплуатации элементов учитываются более точно и, кроме того, принимаются во внимание конструктивные элементы устройства (шасси, корпус, провода и т.п.).

Последовательность расчёта:

1. Определяют коэффициенты электрической нагрузки элементов РЭУ. Пользуются общей формулой (2.3) или ее конкретными реализациями, приведенными в табл.2.1. В качестве электрической нагрузки $F_{\text{ном}}$ используют номинальные или предельные по ТУ электрические характеристики элементов, выбранные для проектируемой конструкции РЭУ. Электрические характеристики $F_{\text{раб}}$ берут из результатов электрического расчёта принципиальной электрической схемы РЭУ или получают путём экспресс-анализа (ориентировочной оценки) электрических нагрузок схемных элементов.

2. Принимают решение о том, какие факторы, кроме коэффициента электрической нагрузки, будут учтены.

Используя результаты конструкторских расчётов, определяют значения параметров, описывающих учитываемые факторы, причём эти значения желательно иметь для каждого элемента.

3. Формируются группы однотипных элементов.

Признаками объединения элементов в одну группу в данном расчёте является не только функциональное назначение элемента, но и примерное равенство коэффициентов электрической нагрузки и параметров, описывающих другие учитываемые эксплуатационные факторы.

Если для элементов одного и того же функционального назначения значения $K_n \leq 0,05 \dots 0,1$, то такие элементы по коэффициенту электрической нагрузки допускается объединять в одну группу.

4. Определяется суммарная интенсивность отказов элементов с учётом коэффициентов электрической нагрузки и условий их работы в составе устройства. Пользуются формулами

$$\lambda_j(v) = \lambda_{0j} \prod_{i=1}^m \alpha(x_i); \quad (3.11)$$

$$\lambda_{\Sigma}(v) = \sum_{j=1}^k n_j \lambda_j(v), \quad (3.12)$$

где $\lambda_j(v)$ – интенсивность отказов элементов j -й группы с учётом электрического режима и условий работы;

- λ_{0j} – справочное значение интенсивности отказов элементов j -й группы; $j=1, \dots, k$;
 n_j – количество элементов в j -й группе; $j=1, \dots, k$;
 k – число сформированных групп однотипных элементов; в предельном случае каждый элемент РЭУ может составить отдельную группу;
 $\alpha()$ – поправочный коэффициент, учитывающий влияние фактора x_i ; $i=1, \dots, m$;
 m – количество принимаемых во внимание факторов.

Напомним, что в качестве факторов x_i могут рассматриваться коэффициенты нагрузки K_n , температура и т.п.

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

6. Подсчитывают показатели восстанавливаемости РЭУ. Среднее время восстановления подсчитывают по формуле (3.5). Вероятность восстановления РЭУ за заданное время τ_3 рассчитывают по выражению (1.24) в предположении, что время восстановления распределено по экспоненциальному закону. Расчётная формула в этом случае принимает вид

$$v(\tau_3) = 1 - e^{-\frac{\tau_3}{T_B}}. \quad (3.13)$$

7. При необходимости подсчитывают коэффициент готовности K_Γ и коэффициент оперативной готовности (вероятность нормального функционирования $P_{н.ф.}(t_3)$). Пользуются формулами [1]

$$K_\Gamma = \frac{T_o}{T_o + T_B}; \quad P_{н.ф.}(t_3) \approx K_\Gamma \cdot P_\Sigma(t_3).$$

3.4. Примеры оценки показателей надёжности проектируемого РЭУ

Пример 3.1. Требуется оценить показатели безотказности усилительного каскада (рис.3.2), функционирующего в составе РЭУ и предназначенного для эксплуатации в наземных стационарных условиях.

Предполагается, что каскад будет изготовлен с использованием печатного монтажа. Заданное время работы $t_3=1000$ ч.

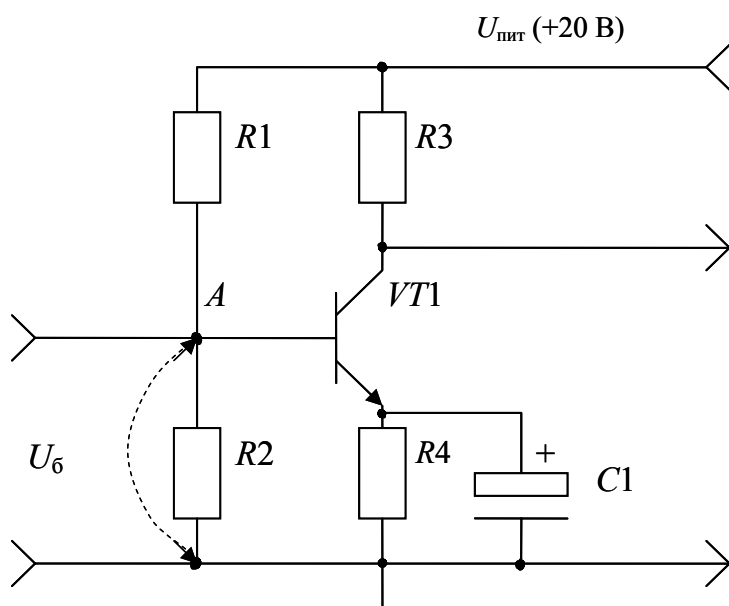


Рис. 3.2. Электрическая принципиальная схема усилительного каскада

Решение. Выполним ориентировочный расчёт показателей надёжности этого каскада.

1. Сформируем группы однотипных элементов и для каждой группы по справочникам (прил.2) определим значение интенсивностей отказов, соответствующее в среднем элементам каждой группы. Для электролитических конденсаторов это значение равно $0,40 \cdot 10^{-6}$ 1/ч, так как тип конденсатора пока не вы-

бран (алюминиевый или танталовый). Для резисторов выбираем значение интенсивности отказов, соответствующее мощности рассеивания менее 0,5 Вт при постоянном токе, поскольку электрический каскад является маломощным, и энергетическая нагрузка элементов в основном определяется режимом по постоянному току. Аналогично выбираются значения интенсивностей отказов для остальных элементов (компонентов). Информация о значениях интенсивностей отказов представлена в табл.3.2.

Таблица 3.2

К примеру ориентировочного расчёта показателей надёжности

Группа элементов	Количество элементов в j -й группе n_j	Интенсивность отказов для элементов j -й группы $\lambda_{0j}, \times 10^{-6}$ 1/ч	Произведение $\lambda_{0j} \cdot n_j, \times 10^{-6}$ 1/ч
Транзистор	1	0,40	0,40
Резистор	4	0,05	0,2
Конденсатор	1	0,40	0,40
Печатная плата	1	0,2	0,2
Пайка	18	0,04	0,72
Σ	—	—	1,92

Число паек определено как суммарное число выводов элементов и внешних выводов каскада. Из табл.3.2 понятно, как подсчитана суммарная интенсивность отказов элементов каскада. В данном случае пайки рассматриваются как элементы.

$$\lambda_{\Sigma} = 1,92 \cdot 10^{-6} \text{ 1/ч.}$$

2. С помощью обобщённого эксплуатационного коэффициента, найденного по справочным таблицам для наземных стационарных условий (см. табл.3.1), скорректируем величину λ_{Σ} , учтя тем самым приближённо электрический режим и условия работы элементов каскада. Примем $K_3=3,0$ (см. табл.3.1). Тогда

$$\lambda_{\Sigma}(v) = 1,92 \cdot 10^{-6} \cdot 3,0 \approx 5,8 \cdot 10^{-6} \text{ 1/ч.}$$

3. По общепринятым формулам для экспоненциального закона надёжности подсчитываем другие показатели надёжности:

а) наработка каскада на отказ

$$T_o = \frac{1}{\lambda_{\Sigma}(v)} = \frac{1}{5,8 \cdot 10^{-6}} \approx 172400 \text{ ч.}$$

Можно установить, что в данном случае значение T_o не имеет физического смысла, а носит чисто расчётный характер;

б) вероятность безотказной работы за время t_3

$$P_{\Sigma}(t_3) = e^{-t_3 \cdot \lambda(v)} = e^{-1000 \cdot 5,8 \cdot 10^{-6}} \approx 0,994;$$

в) гамма-процентная наработка до отказа (при $\gamma=99\%$)

$$T_{\gamma} = -\frac{\ln\left(\frac{\gamma}{100}\right)}{\lambda_{\Sigma}(v)} = -\frac{\ln 0,99}{5,8 \cdot 10^{-6}} \approx 1733 \text{ ч.}$$

Пример 3.2. Выполним уточненный расчёт показателей безотказности усилительного каскада, рассмотренного в примере 2 [9].

Параметры элементов:

$$R1=43 \text{ кОм} \pm 10\%; R2=10 \text{ кОм} \pm 10\%;$$

$$R3=1,2 \text{ кОм} \pm 10\%; R4=300 \text{ Ом} \pm 10\%;$$

$$C1=10 \text{ мкФ} \begin{matrix} +30\% \\ -10\% \end{matrix}.$$

Для сборки каскада использован печатный монтаж. Тип выбранных резисторов ОМЛТ с номинальной мощностью рассеивания $P_{ном}=0,125$ Вт и допуском на сопротивление $\pm 10\%$. Тип выбранного конденсатора К50-6 с допустимым напряжением $U_{ном}=6$ В. Тип транзистора VT1 – КТ301Д. Напряжение источника питания $U_{пит}=20$ В $\pm 10\%$.

Усилительный каскад используется в составе радиоэлектронного устройства, для которого характерны следующие условия эксплуатации:

диапазон рабочих температур $-10...+45\text{ }^{\circ}\text{C}$; относительная влажность воздуха до 80% при температуре $+25\text{ }^{\circ}\text{C}$; атмосферное давление $93\pm 13\text{ кПа}$.

Расчёт теплового режима устройства, в котором используется усилительный каскад, показал, что перегрев в нагретой зоне составляет не более $18\text{ }^{\circ}\text{C}$, а средний нагрев воздуха в устройстве – примерно $12\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Решение. 1. Определим, какие значения коэффициентов электрической нагрузки характерны для выбранных элементов усилительного каскада.

Для подсчета указанных коэффициентов воспользуемся формулами табл.2.1. Номинальные или допустимые по ТУ эксплуатационные электрические характеристики, используемые в формулах табл.2.1 для резисторов и конденсатора указаны в условии примера, а именно: для резисторов $P_{\text{ном}}=0,125\text{ Вт}$; для конденсатора $U_{\text{ном}}=6\text{ В}$.

Для транзистора допустимые (предельные) по ТУ электрические характеристики определим из справочных данных на транзистор типа КТ301Д. Получим:

- постоянный ток коллектора $I_{\text{к}}=10\text{ мА}$;
- постоянное напряжение между коллектором и эмиттером $U_{\text{кэ}}=30\text{ В}$;
- мощность, рассеиваемая на коллекторе при температуре $+60^{\circ}\text{C}$, $P_{\text{доп}}=150\text{ мВт}$;
- мощность, рассеиваемая на коллекторе при температуре $+85\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P_{\text{доп}}=58\text{ мВт}$;
- при повышении температуры от $+60$ до $+85\text{ }^{\circ}\text{C}$ допустимая мощность снижается линейно, т.е. по закону

$$P_{\text{доп}} = 370,8 - 3,68 \cdot t^{\circ}.$$

Значения электрических характеристик элементов в рабочем режиме определим, выполнив экспресс-анализ (приближенный расчёт) электрического режима рассматриваемого усилительного каскада (см. рис.3.2).

Экспресс-анализ для простоты иллюстрации выполним для средних значений параметров элементов. При детальном инженерном анализе следует учитывать экстремальные условия нагрузки всех элементов. С методикой такого анализа можно ознакомиться, например, в работе [10].

При экспресс-анализе рассматриваемого усилительного каскада следует учесть эквивалентное входное сопротивление цепи база–эмиттер, включенное параллельно резистору $R2$. Это сопротивление (r_{BX}) можно определить как

$$r_{\text{BX}} = r_{\text{б}} + (1 + \beta)R4 \approx (1 + \beta)R4,$$

где $r_{\text{б}}$ – сопротивление тела базы транзистора.

Согласно ТУ транзистор КТ301Д имеет коэффициент усиления по току $\beta = 20 \dots 60$.

В данном примере, по условию, максимальная рабочая температура устройства составляет $+45^\circ\text{C}$, а перегрев в нагретой зоне – до 18°C . Следовательно, максимальная рабочая температура транзистора может быть $+63^\circ\text{C}$. Поэтому для дальнейшего анализа из справочника взяты значения коэффициента усиления по току, соответствующие именно этой температуре.

Для расчётов примем среднее значение коэффициента

$$\beta = \frac{20 + 60}{2} = 40.$$

Тогда

$$r_{\text{BX}} = (1 + 40) \cdot 300 = 12300 \text{ Ом} = 12,3 \text{ кОм}.$$

Общее сопротивление параллельно включенных резистора $R2$ и сопротивления r_{BX} .

$$R_{\text{BX}} = \frac{R2 \cdot r_{\text{BX}}}{R2 + r_{\text{BX}}} = \frac{10 \cdot 12,3}{10 + 12,3} \approx 5,52 \text{ кОм}.$$

Ток, протекающий через резистор $R1$,

$$I_{R1} = \frac{U_{\text{пит}}}{R1 + R_{\text{BX}}} = \frac{20}{43 + 5,52} \approx 0,41 \text{ мА}.$$

Напряжение на базе (в точке А)

$$U_{\text{б}} = I_{R1} \cdot R_{\text{BX}} = 0,41 \cdot 5,52 \approx 2,26 \text{ В}.$$

Ток, протекающий через базу транзистора,

$$I_{\text{б}} = \frac{U_{\text{б}}}{r_{\text{BX}}} = \frac{2,26}{12,3} \approx 0,184 \text{ мА}.$$

Ток коллектора транзистора

$$I_{\text{к}} = \beta \cdot I_{\text{б}} = 40 \cdot 0,184 = 7,46 \text{ мА.}$$

Мощности, рассеиваемые на резисторах:
на резисторе $R1$

$$P_{R1} = I_{R1}^2 R1 = (0,41 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 43 \cdot 10^3 \approx 7,23 \cdot 10^{-3} \text{ Вт};$$

на резисторе $R2$

$$P_{R2} = \frac{U_6^2}{R2} = \frac{2,26^2}{10 \cdot 10^3} \approx 0,51 \cdot 10^{-3} \text{ Вт};$$

на резисторе $R3$

$$P_{R3} = I_{\text{к}}^2 R3 = (7,36 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 1,2 \cdot 10^3 \approx 65 \cdot 10^{-3} \text{ Вт};$$

на резисторе $R4$ (предполагая, что $I_{R4} = I_3 \approx I_{\text{к}}$)

$$P_{R4} = I_{\text{к}}^2 R4 = (7,36 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 300 \approx 16,3 \cdot 10^{-3} \text{ Вт.}$$

Напряжение на конденсаторе

$$U_{C1} = U_{R4} = I_{R4} \cdot R4 = I_{\text{к}} \cdot R4 = 7,36 \cdot 10^{-3} \cdot 300 \approx 2,2 \text{ В.}$$

Напряжение на транзисторе

$$U_{VT1} = U_{\text{пит}} - (U_{R4} + U_{R3}) = U_{\text{пит}} - (U_{R4} + I_{\text{к}} \cdot R3) = \\ 20 - (2,2 + 7,36 \cdot 10^{-3} \cdot 1,2 \cdot 10^3) \approx 8,97 \text{ В.}$$

Мощность, рассеиваемая на транзисторе (коллекторе).

$$P_{VT1} = I_{\text{к}} \cdot U_{VT1} = 7,36 \cdot 10^{-3} \cdot 8,97 \approx 0,066 \text{ Вт} = 66 \text{ мВт.}$$

Коэффициент электрической нагрузки резисторов $R1$ - $R4$ и конденсатора $C1$ подсчитываем по формулам (табл.2.1) с учётом того, что для резисторов $P_{\text{ном}} = 0,125 \text{ Вт}$, а для конденсатора $U_{\text{ном}} = 6 \text{ В}$.

Нетрудно убедиться, что для транзистора КТ301Д в рассматриваемой электрической схеме определяющими электрическими характеристиками, влияющими на надёжность, являются как ток коллектора, так и прикладываемое к нему напряжение. Поэтому учёт электрической нагруженности транзистора выполним с помощью коэффициента электрической нагрузки по мощности. Для подсчёта указанного коэффициента необходимо располагать значением $P_{\text{доп}}$,

соответствующим максимальной рабочей температуре транзистора. Эту температуру определим как

$$t_{V1\max}^{\circ} = t_{\text{раб.макс}}^{\circ} + \Delta t^{\circ},$$

где $t_{\text{раб.макс}}^{\circ}$ – максимальная рабочая температура устройства.

Получим

$$t_{V1\max}^{\circ} = 45 + 18 = 63^{\circ}\text{C}.$$

Согласно ТУ, с повышением температуры от $+60$ до $+85^{\circ}\text{C}$ допустимая мощность, рассеиваемая транзистором, изменяется по закону

$$P_{\text{доп}}^{(t^{\circ})} = 370,8 - 3,68 \cdot t^{\circ}, \text{ мВт.}$$

Для температуры $t^{\circ} = 63^{\circ}\text{C}$

$$P_{\text{доп}}^{(63^{\circ})} = 370,8 - 3,68 \cdot 63 \approx 139 \text{ мВт.}$$

Следовательно, коэффициент нагрузки транзистора

$$K_{\text{н}} = \frac{P_{VT1}}{P_{\text{доп}}^{(t^{\circ})}} = \frac{66}{139} \approx 0,47.$$

Значения коэффициентов электрической нагрузки, подсчитанные для элементов усилительного каскада, указаны в табл.3.3.

Таблица 3.3

К примеру расчёта показателей надёжности

Группа элементов (поз. обозн.)	Кол-во элементов в группе n_j	Справочное значение λ_{0j} , $\times 10^{-6}$ 1/ч	Коэф-т электр. нагрузки $K_{\text{н}}$	Макс. рабочая температура, $^{\circ}\text{C}$	Произведение поправочных коэф-тов α_{Σ}	Значение $\lambda_j(v)$, $\times 10^{-6}$ 1/ч	Значение $n_j \cdot \lambda_j(v)$, $\times 10^{-6}$ 1/ч
VT1	1	0,40	0,47	63	1,5	0,600	0,6
R1,R2	2	0,05	<0,1	63	0,15	0,008	0,016
R3	1	0,05	0,52	63	0,7	0,035	0,035
R4	1	0,05	0,13	63	0,2	0,01	0,01
C1	1	0,55	0,37	58	2,0	1,1	1,1
Печат. плата	1	0,2	—	58	1,0	0,2	0,2
Пайка	18	0,04	—	58	3,0	0,12	2,16
Σ	—						$\approx 4,2$

2. При учёте электрического режима и условий работы элементов усилительного каскада примем во внимание два важнейших фактора: коэффициенты электрической нагрузки K_n и температуру t° .

Коэффициенты электрической нагрузки элементов были определены выше (см. табл.3.3).

Температуру элементов определим следующим образом: для теплонагруженных элементов ($R1-R4$ и $VT1$)

$$t_i^\circ = t_{\text{раб.мах}}^\circ + \Delta t_3^\circ,$$

где $t_{\text{раб.мах}}^\circ$ – максимальная рабочая температура;

Δt_3° – перегрев в нагретой зоне устройства;

для нетеплонагруженных элементов (конденсатор, печатная плата, пайки)

$$t_i^\circ = t_{\text{раб.мах}}^\circ + \Delta t_{\text{в}}^\circ,$$

где $\Delta t_{\text{в}}^\circ$ – средний перегрев воздуха в устройстве.

Расчётные значения температуры элементов внесены в табл.3.3.

3. Формируем группы однотипных элементов.

В данном случае образуются две группы однотипных элементов с количеством элементов в группе более одного. Первая группа – это резисторы $R1$ и $R2$ (для них $K_n < 0,1$), вторая группа – пайки. Отдельные группы образуют элементы $R3$, $R4$, $C1$ и $VT1$. Самостоятельную группу составляет также печатная плата.

4. Суммарную интенсивность отказов элементов усилительного каскада определяем по формулам (3.11), (3.12). При этом справочные значения интенсивностей отказов элементов каждой группы находим с использованием прил.1, а поправочные коэффициенты, учитывающие влияние коэффициентов электрической нагрузки и температуры, определяем по номограммам, приведенным в прил.2 на рис.П2.1-П2.3.

Результаты расчётов сведены в табл.3.3.

Расчётное значение величины $\lambda_\Sigma(v)$ составляет

$$\lambda_\Sigma(v) \approx 4,2 \cdot 10^{-6} \text{ 1/ч.}$$

5. Определяем наработку на отказ:

$$T_o = 1/\lambda_\Sigma(v) = 1/4,2 \cdot 10^{-6} \approx 238100 \text{ ч.}$$

Рассчитываем вероятность безотказной работы усилительного каскада за время $t_3=1000$ ч.

Получим

$$P(t_3) = e^{-t_3 \cdot \lambda_{\Sigma}(v)} = e^{-1000 \cdot 4,2 \cdot 10^{-6}} \approx 0,996.$$

6. Определяем гамма-процентную наработку до отказа. Для значения $\gamma=99\%$

$$T_{\gamma} = -\frac{\ln(99/100)}{4,2 \cdot 10^{-6}} \approx 2393 \text{ ч.}$$

7. Подсчитываем среднее время восстановления $T_{\text{в}}$ по формуле

$$T_{\text{в}} \approx \frac{\sum_{j=1}^k n_j \tau_j \lambda_j(v)}{\sum_{j=1}^k n_j \lambda_j(v)},$$

где τ_j – среднее время восстановления элементов j -й группы;

k – количество групп однотипных элементов, включая пайки, несущие конструкции и т.п.

Расчёт величины $T_{\text{в}}$ с использованием данных прил. 3 и табл.3.3 сведён в табл.3.4.

С учётом того, что

$$\sum_{j=1}^k n_j \lambda_j(v) = 4,2 \cdot 10^{-6} \text{ 1/ч,}$$

$$T_{\text{в}} \approx \frac{2,8 \cdot 10^{-6}}{4,2 \cdot 10^{-6}} \approx 0,7 \text{ ч.}$$

Таблица 3.4

К примеру расчёта показателей восстанавливаемости

Группа элементов	Количество элементов в группе n_j	Значение $\lambda_j(v)$, $\times 10^{-6}$ 1/ч	Значение τ_j , ч (прил.4)	Произведение $n_j \cdot \tau_j \cdot \lambda_j(v)$, $\times 10^{-6}$
VT1	1	0,6	0,8	0,48
R1, R2	2	0,008	0,5	0,008
R3	1	0,035	0,5	0,018
R4	1	0,01	0,5	0,005
C1	1	1,1	0,55	0,605
Печат. плата	1	0,2	3,0	0,600
Пайка	18	0,12	0,5	1,080
Σ	—	—	—	$\approx 2,8$

8. Подсчитываем значение вероятности восстановления устройства за заданное время τ_3 (примем $\tau_3=1,5$ ч)

$$v(\tau_3) = 1 - e^{-\tau_3/T_B} \approx 0,88.$$

3.5. Принципы расчёта безотказности РЭУ с учётом цикличности работы

Ранее было показано, как рассчитать вероятность безотказной работы для заданного времени t , причём предполагалось, что это время выбирается непрерывно. В действительности же для значительной части РЭУ имеет место циклический характер работы, то есть по истечении некоторой наработки изделие выключается, а через некоторое время снова может быть включено. Процессы включения и выключения РЭУ могут существенно сказаться на реальной их безотказности. Покажем, как учесть цикличность работы, то е. процессы включения и выключения РЭУ.

Вероятность безотказной работы за какое-то интересующее календарное время t может быть получена в виде

$$P_{\text{РЭУ}}(t) = \left| \begin{matrix} t_3 = t_p \\ t = t_p + t_{xp} \end{matrix} \right| = e^{-(\lambda_p t_p + \lambda_{xp} t_{xp} + \lambda_{\text{ц}} t_{\text{ц}})} = e^{-\lambda_3 t};$$

где t – интересующий календарный промежуток времени;

t_p – заданная наработка (время работы) за рассматриваемый календарный период t ;

t_{xp} – время, в течение которого РЭУ не использовалось по назначению, за рассматриваемый промежуток t ;

λ_p – интенсивность отказов РЭУ в рабочем режиме, представляет собой суммарную интенсивность отказов элементов РЭУ с учётом электрического режима и условий работы элементов соответствующего РЭУ;

$\lambda_{\text{ц}}$ – интенсивность отказов с учётом цикличности работы РЭУ. Эта величина в определённом смысле является условной и имеет размерность $[\lambda_{\text{ц}}]=1/\text{цикл}$. Экспериментально установлено, что для элементов РЭУ $\lambda_{\text{ц.эл.}} \approx (1..10) \cdot 10^{-8} \text{ 1/цикл}$;

$N_{\text{ц}}$ – количество циклов (включено-выключено) за рассматриваемый календарный период t .

Из приведённой формулы можно выделить, так называемую, эксплуатационную интенсивность отказов РЭУ, отнесённую к календарному промежутку t .

$$\lambda_{\text{э}} = \lambda_{\text{р}} \cdot \frac{t_{\text{р}}}{t} + \lambda_{\text{хр}} \cdot \frac{t_{\text{хр}}}{t} + \lambda_{\text{ц}} \cdot \frac{N_{\text{ц}}}{t};$$

$$N_{\text{ц}}/t = F_{\text{ц}};$$

где $t = t_{\text{р}} + t_{\text{хр}}$;

$F_{\text{ц}}$ – частота циклов работы, [цикл/час].

Замечено, что цикличность сказывается существенно на надёжности при $F_{\text{ц}} \geq 1$ цикл/час.

Задача.

Для РЭУ при значении $t_{\text{р}} = t_3 = 1000$ ч получено $p(t_3) = 0,95$. Требуется определить вероятность безотказной работы РЭУ за календарный период $t = 10000$ ч, предполагая, что значение $t_{\text{р}} = 1000$ ч будет выбрано примерно за этот календарный период. Число циклов в сутки ≈ 3 , $N_{\text{ц}}^{\text{сут}} = 3$.

Решение.

$$1. t_3 = t_{\text{р}} = 1000 \text{ ч}, \quad t_{\text{хр}} = t - t_{\text{р}} = 10000 - 1000 = 9000 \text{ ч}.$$

$$2. p(t_{\text{р}}) = e^{-\lambda_{\text{р}} t_{\text{р}}};$$

$$\log_e p(t_{\text{р}}) = -\lambda_{\text{р}} t_{\text{р}};$$

$$\lambda_{\text{р}} = -\frac{\ln p(t_{\text{р}})}{t_{\text{р}}} = -\frac{\ln 0,95}{1000} = 5 \times 10^{-5} \text{ (1/ч)}.$$

3. Определяем значение $\lambda_{\text{хр}}^{(\text{РЭУ})}$. Известно [7]:

$$\lambda_{\text{хр}} \approx (0,01 \dots 0,001) \lambda_3 \Rightarrow \lambda_{\text{хр}} = 0,005 \lambda_{\text{р}} \Rightarrow \lambda_{\text{хр}}^{(\text{РЭУ})} = 25 \times 10^{-8} \text{ (1/ч)}.$$

4. Предположим, что РЭУ содержит $N = 500$ элементов, тогда

$$\lambda_{\text{ц}}^{(\text{РЭУ})} = \lambda_{\text{ц.эл}} N = (1 \dots 10) \cdot 10^{-8} \cdot 500 = 2,5 \cdot 10^{-5} \text{ 1/цикл}.$$

5. Количество циклов за календарный период:

$$N_{\text{ц}} = N_{\text{ц}}^{(\text{сут})} \cdot \underset{\substack{\text{число} \\ \text{суток}}}{S} = \left| S = \frac{10000}{24} = 417 \right| = 3 \cdot 417 \approx 1250 \text{ циклов}.$$

$$6. p(t) = e^{-(\lambda_{\text{р}} t_{\text{р}} + \lambda_{\text{хр}} t_{\text{хр}} + \lambda_{\text{ц}} N_{\text{ц}})} = \left| \text{где } \lambda_{\text{р}}, \lambda_{\text{хр}}, \lambda_{\text{ц}} \text{ относится к РЭУ в целом} \right| = 0,92.$$

Задача.

Предполагая, что $P_{\text{ЭВМ}}(t_p=1000 \text{ ч}) = 0,99$, $n_{\text{ЭВМ}} = 1000$ элемен., выяснить, что хуже с точки зрения надёжности: одно включение-выключение или же непрерывная работа в течение одного часа.

Решение:

1. Определяем значение λ_p . Пользуясь гипотезой об экспоненциальном законе надёжности ЭВМ, получим

$$p(t_p) = e^{-\lambda_p t_p} \Rightarrow \lambda_p = -\frac{\ln p(t_p)}{t_p} = -\frac{\ln 0,99}{1000 \text{ ч}} = 1 \cdot 10^{-5} \text{ 1/ч.}$$

2. Определяем интенсивность отказов ЭВМ с учётом цикличности

$$\lambda_{\text{ц}}^{(\text{ЭВМ})} = \lambda_{\text{ц,эл}} N = 5 \cdot 10^{-8} \cdot 1000 = 5 \cdot 10^{-5} \text{ 1/цикл.}$$

3. Определяем вероятность безотказной работы ЭВМ за один цикл (включено-выключено):

$$p(t) = e^{-(\lambda_p t_p + \lambda_{\text{xp}} t_{\text{xp}} + \lambda_{\text{ц}} N_{\text{ц}})} = e^{-(1 \cdot 10^{-5} + 5 \cdot 10^{-5} \cdot 1)} = 0,99994.$$

4. Вероятность безотказной работы ЭВМ в течение одного часа работы ($t_p = 1 \text{ ч}$):

$$p(t) = e^{-5 \cdot 10^{-5} \cdot 1} = 0,99995.$$

Следовательно, с точки зрения надёжности одно включение-выключение хуже, чем один час непрерывной работы.

Определим, какому времени непрерывной работы с точки зрения равенства вероятностей отказа соответствует одно включение-выключение ЭВМ.

Из равенства

$$\lambda_{\text{ц}} \cdot N_{\text{ц}} \approx \lambda_p \cdot t_p$$

получим

$$t_p = \lambda_{\text{ц}} \cdot N_{\text{ц}} / \lambda_p.$$

Легко убедиться: одно включение-выключение с точки зрения надёжности равносильно пяти часам непрерывной работы ЭВМ.

3.6. Расчёт показателей надёжности при разных законах распределения времени до отказа элементов

Изложенные выше методики оценки показателей надёжности проектируемых РЭУ исходят из того, что для элементов имеет место экспоненциальный закон надёжности, т.е. время до отказа распределено по экспоненциальному закону

$$w(t) = \lambda_i e^{-\lambda_i t}; t \geq 0$$

и, следовательно, для вероятности безотказной работы элементов за время t_3 справедливо выражение

$$p_i(t_3) = e^{-\lambda_i t_3},$$

где λ_i – интенсивность отказов i -го элемента.

Опыт эксплуатации РЭУ, а также проведенные исследования показали, что такое допущение в ряде случаев может привести к заметным ошибкам. Экспериментально было установлено, что время до отказа элементов может быть описано следующими законами (моделями):

а) экспоненциальным (резисторы, конденсаторы, некоторые типы полупроводниковых приборов, интегральных микросхем и др.);

б) законом Вейбулла (многие типы полупроводниковых приборов, интегральных микросхем, механические элементы);

в) нормальным (элементы, функционирование которых связано заметным износом конструктивных частей – элементы коммутации и механические);

г) логарифмически нормальным (некоторые типы коммутирующих и механических элементов).

Полной информации о законах распределения времени до отказа элементов пока нет. При расчёте показателей надёжности РЭУ в случае различных законов распределения времени до отказа пользуются основным расчётным соотношением

$$P_{\Sigma}(t_3) = p_1(t_3) \cdot p_2(t_3) \cdot \dots \cdot p_N(t_3),$$

однако $p_i(t_3)$ определяются с учётом конкретного закона распределения.

Рассмотрим, как подсчитывать $p_i(t_3)$ для законов перечисленных выше.

1. Экспоненциальный закон.

Плотность распределения времени до отказа в этом случае имеет вид

$$w(t) = \lambda_i e^{-\lambda_i t},$$

где λ_i – параметр экспоненциального распределения для i -го элемента, численно равный интенсивности его отказов.

При экспоненциальном распределении учёт коэффициентов электрической нагрузки и условий работы элементов, как отмечалось выше, выполняется путём корректировки показателя λ_i с использованием формулы

$$\lambda_i(v) = \lambda_{0i} \prod_{j=1}^m \alpha(x_j),$$

где $\lambda_i(v)$ – интенсивность отказов i -го элемента с учётом коэффициентов электрической нагрузки и условий работы элементов;

λ_{0i} – справочное значение интенсивности отказов i -го элемента;

$\alpha(x_j)$ – поправочный коэффициент, учитывающий влияние фактора x_j ; $j=1, \dots, m$;

m – количество факторов.

Значение $p_i(t_3)$ подсчитывают по выражению

$$p_i(t_3) = e^{-t_3 \lambda_i(v)},$$

где t_3 – заданное время работы РЭУ, а, следовательно, i -го элемента в составе РЭУ.

2. Закон Вейбулла. Плотность распределения времени до отказа в этом случае задается выражением

$$w(t) = \rho \beta t^{\beta-1} e^{-t^\beta},$$

где ρ, β – параметры распределения Вейбулла.

Справочными показателями надёжности должны быть ρ и β .

Учёт коэффициентов электрической нагрузки и условий эксплуатации элементов может выполняться путём корректировки параметра ρ , используя выражение

$$\rho_i(v) = \rho_{0i} \prod_{j=1}^m \alpha(x_j) \quad (3.14)$$

где ρ_{0i} – справочное значение показателя ρ_i ;

$\alpha(x_j)$ – поправочный коэффициент для ρ_i , учитывающий влияние фактора x_j .

К сожалению, экспериментальные данные о значениях поправочных коэффициентов для ρ отсутствуют.

Формула для подсчёта $p_i(t_3)$ в случае закона Вейбулла может быть получена в виде

$$p_i(t_3) = e^{-t_3^\beta \rho_i(v)} \quad (3.15)$$

Экспериментально установлено, что для большинства полупроводниковых приборов коэффициент формы β лежит в диапазоне 0,3...0,7. Замечено, чем выше культура производства и совершеннее технология изготовления полупроводниковых приборов, тем ниже значение коэффициента формы β .

Если $\beta=1$, то имеем дело с чисто экспоненциальным распределением. Для многих механических элементов коэффициент формы β приближается к 2...3, и распределение Вейбулла в этом случае заменяют нормальным распределением.

3. Нормальный закон.

График плотности распределения времени до отказа в этом случае имеет вид, показанный на рис.3.3.

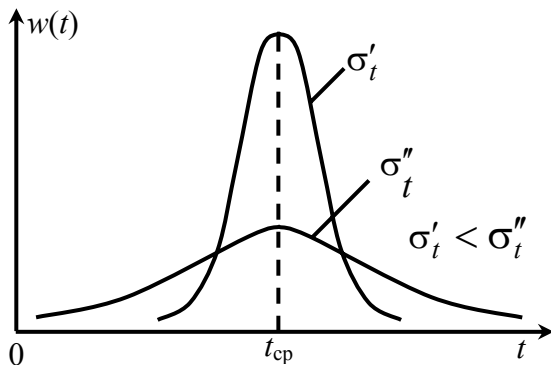


Рис.3.3 График плотности распределения

Параметрами распределения в этом случае являются $t_{ср}$ – среднее время безотказной работы (среднее время до отказа) и σ_t – среднее квадратическое отклонение времени безотказной работы. Следовательно, в этом случае они должны использоваться в качестве справочных данных о надёжности i -го элемента.

Учёт коэффициентов электрической нагрузки и условий эксплуатации элементов можно выполнить путём корректировки показателя $t_{ср}$, используя выражение

$$t_{ср.i}(v) = \frac{t_{ср.i}^{(0)}}{\prod_{j=1}^m \alpha(x_j)}, \quad (3.16)$$

где $t_{cp.i}(v)$ – среднее время безотказной работы i -го элемента с учётом коэффициента электрической нагрузки и условий работы этого элемента;

$\alpha(x_j)$ – поправочный коэффициент для $t_{cp.i}$, учитывающий влияние j -го фактора (смысл этого коэффициента аналогичен экспоненциальному распределению и распределению Вейбулла);

$t_{cp.i}^{(0)}$ – справочное значение $t_{cp.i}$.

Экспериментальные данные о значениях поправочных коэффициентов t_{cp} отсутствуют.

Значение $p_i(t_3)$ может быть определено как

$$p_i(t_3) = S = \int_{t_3}^{\infty} \omega_i(t) dt = F(\infty) - F(t_3) =$$

$$= 1 - \Phi\left(\frac{t_3 - t_{cp.i}}{\sigma_{ti}}\right) = \left| \begin{array}{l} \text{С учётом свойства} \\ \text{функции } \Phi(\dots) \end{array} \right| = \Phi\left(\frac{t_{cp.i} - t_3}{\sigma_{ti}}\right), \quad (3.17)$$

где $\Phi(\dots)$ – табличная функция стандартного нормального распределения (см. табл. П4.1, прил. 4).

Смысл приведённой формулы понятен из рис. 3.4.

2. Логарифмически нормальный закон. В случае этого закона необходимо помнить: по нормальному закону распределено не время до отказа, а логарифм этого времени. Значения вероятностей $p(t_3)$ определяют аналогично нормальному закону.

3.7. Параметрическая надёжность РЭУ

3.7.1. Параметрическая надёжность и функционирование РЭУ

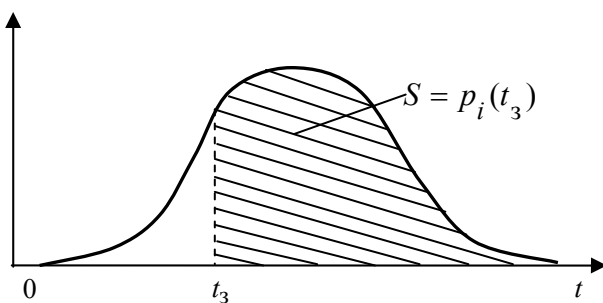


Рис. 3.4. К определению вероятности $p(t_3)$

В качестве количественной характеристики **параметрической надёжности** РЭУ используют вероятность отсутствия в устройстве постепенных отказов при его работе в заданных условиях эксплуатации в течение времени t_3 . Понятие параметрической надёжности прямо связано с понятием постепенных отказов.

Для аналоговых РЭУ постепенный отказ проявляется в снижении эффективности использования устройств. Например, предположим, что согласно техническим условиям чувствительность радиоприёмного устройства должна быть не ниже 100 мкВ/м. Допустим, что с течением времени чувствительность ухудшилась и стала 150 мкВ/м, на слух мы можем это даже не почувствовать. Однако способность радиоприёмного устройства принимать слабые сигналы снизилась, т.е. можно говорить о снижении эффективности его использования. В данном случае зафиксировать наступление постепенного отказа можно путём измерения уровня чувствительности с помощью контрольно-измерительных приборов. Но если чувствительность ухудшится ещё в большей степени и станет равной, например 900 мкВ/м, то весьма вероятно, что мы и на слух почувствуем: с чувствительностью радиоприёмного устройства что-то не так.

Применительно к цифровым РЭУ постепенный отказ может вызывать ложное срабатывание логических элементов или, наоборот, несрабатывание в нужный момент. Поэтому постепенные отказы в цифровых устройствах обычно приводят к искажению или даже потере обрабатываемой информации.

3.7.2. Причины, обуславливающие появление постепенных отказов

Основными причинами, вызывающими возникновение постепенных отказов, являются следующие:

- производственный разброс выходного параметра, вызываемый действием производственных погрешностей;

- уход выходного параметра от номинального значения из-за процессов старения;

- отклонения выходного параметра от номинального значения под воздействием дестабилизирующих факторов (температуры, влажности и т.д.).

Ввиду наличия производственного (технологического) разброса выходной параметр уже может заметно отклониться от номинального значения. В процессе эксплуатации, а также под воздействием дестабилизирующих факторов может произойти дальнейшее изменение выходного параметра. В итоге его значение может достигнуть критической границы и затем выйти за неё (рис.3.5). Наступит постепенный отказ (момент времени $t_{от}$).

Постепенные отказы выявляют и устраняют в основном в процессе профилактических мероприятий, согласно установленному для данных РЭУ графику (так называемых регламентных работ), а также в процессе эксплуатации РЭУ.

3.8. Оценка параметрической надёжности РЭУ на этапе проектирования

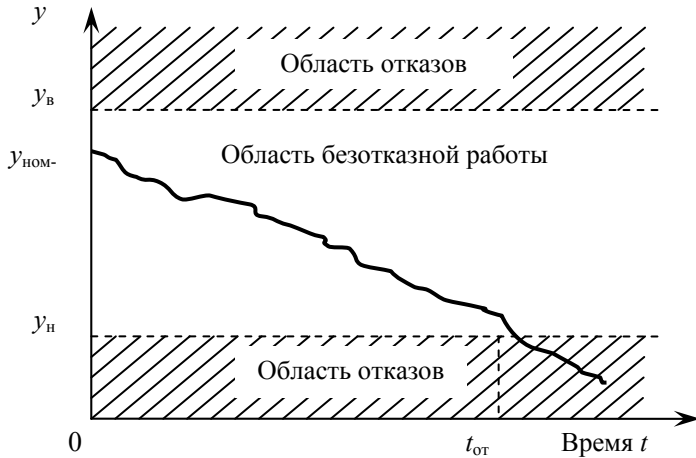


Рис.3.5. Изменение выходного параметра при эксплуатации РЭС

Точный расчёт уровня параметрической надёжности проектируемых РЭУ является достаточно сложной задачей. На практике используют приближенные методы, основанные на ряде допущений. Рассмотрим один из методов, но сначала сделаем следующее замечание.

Старение проявляется в сравнительно медленном изменении параметров РЭУ, обычно в одну сторону, хотя

скорость старения для разных экземпляров одного и того же вида изделий различна. В интервале времени от $t=0$ до $t=t_3$ худшим случаем с точки зрения ухода выходного параметра от номинального значения является, как правило, момент времени $t=t_3$. Поэтому в дальнейшем под словами «к моменту времени $t=t_3$ с учётом действия дестабилизирующих факторов» будем понимать худший случай с точки зрения параметрической надёжности изделия в интервале времени от $t=0$ до $t=t_3$ в заданных условиях эксплуатации.

В инженерных расчётах обычно пользуются гипотезой о том, что выходной параметр y в течение времени t_3 , для которого интересуются вероятностью отсутствия постепенных отказов, распределен по нормальному закону. Замечено, что в большинстве случаев выходные параметры РЭУ хорошо описываются этим законом на всем участке эксплуатации от $t=0$ до $t=t_3$. Однако в процессе эксплуатации, т.е. с изменением времени t , а также под воздействием дестабилизирующих факторов изменяются параметры нормального закона. Обычно происходит смещение среднего значения выходного параметра и изменяется степень его рассеивания относительно нового среднего значения (рис.3.6).

Здесь приняты следующие обозначения:

$w(y/t=0)$ – функция плотности распределения выходного параметра y в момент времени $t=0$ без учёта действия дестабилизирующих факторов (температуры, влажности и т.п.);

$w(y/t=t_3)$ – функция распределения выходного параметра y к моменту времени $t=t_3$ с учётом действия дестабилизирующих факторов.

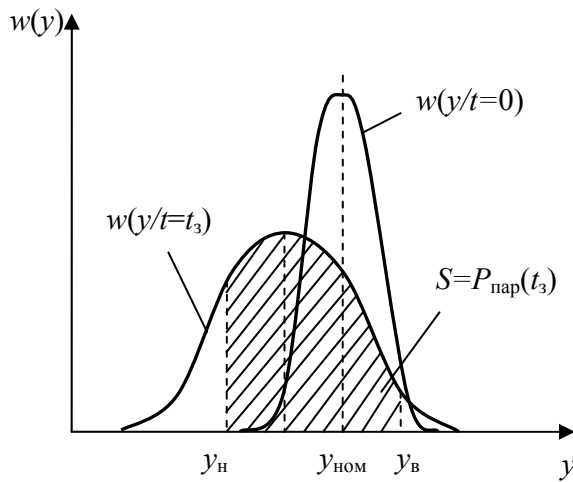


Рис.3.6. Влияние процесса эксплуатации на распределение параметра РЭУ:
 $y_н$, $y_в$ – нижняя и верхняя допустимые границы

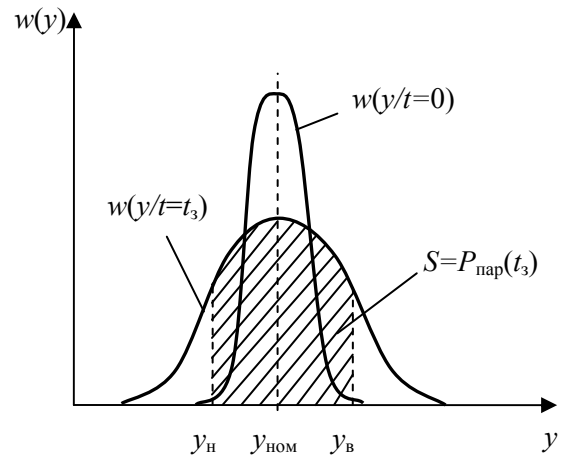


Рис.3.7. Изменение рассеивания выходного параметра при эксплуатации РЭУ

В ряде случаев смещения среднего (номинального) значения выходного параметра не происходит, а изменяется (как правило, возрастает) степень рассеивания этого параметра около среднего значения (рис.3.7). Пусть допуск на выходной параметр y задан, исходя из служебного назначения РЭУ, нижней $y_н$ и верхней $y_в$ границами. Тогда вероятность, с которой гарантируется отсутствие постепенного отказа в течение промежутка времени t_3 численно равна заштрихованной площади (рис.3.6, 3.7).

Воспользуемся гипотезой о нормальном распределении выходного параметра y . Искомую вероятность $P_{пар}(t_3)$ определим с помощью формулы

$$P(a \leq y \leq b) = \Phi\left(\frac{b-m}{\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{a-m}{\sigma}\right), \quad (3.18)$$

где a, b – нижняя и верхняя границы интересующей области;
 m – математическое ожидание (среднее значение) параметра y ;
 σ – среднее квадратическое отклонение параметра y ;
 $\Phi(\dots)$ – функция стандартного нормального распределения ($\sigma=0$; $m=1$).

Применительно к рассматриваемой задаче параметры в формуле (3.18) примут значения:

$$a=y_н; \quad b=y_в; \quad m=M(y/t=t_3); \quad \sigma=\sigma(y/t=t_3),$$

где $M(y/t=t_3)$ – среднее значение выходного параметра в момент времени $t=t_3$ с учётом действия дестабилизирующих факторов;

$\sigma(y/t=t_3)$ – среднее квадратическое отклонение выходного параметра в момент времени $t=t_3$ с учётом действия дестабилизирующих факторов.

Тогда вероятность $P_{\text{пар}}(t_3)$, с которой гарантируется отсутствие постепенного отказа, определится как

$$P_{\text{пар}}(t_3) = \Phi \left[\frac{y_{\text{в}} - M(y/t=t_3)}{\sigma(y/t=t_3)} \right] - \Phi \left[\frac{y_{\text{н}} - M(y/t=t_3)}{\sigma(y/t=t_3)} \right]. \quad (3.19)$$

Если при анализе параметрической надёжности использовать относительные погрешности выходного параметра y , то расчётная формула может быть получена по аналогии с формулой (3.19), согласно рис.3.8.

В этом случае имеем:

$$a = -\delta; \quad b = \delta; \quad m = M \left(\frac{\Delta y}{y} / t = t_3 \right); \quad \sigma = \sigma \left(\frac{\Delta y}{y} / t = t_3 \right);$$

где δ – половина поля допуска относительной погрешности выходного параметра, задаваемая исходя из служебного назначения РЭУ.

Тогда, используя выражение (3.18), можно записать

$$P_{\text{пар}}(t_3) = \Phi \left[\frac{\delta - M \left(\frac{\Delta y}{y} / t = t_3 \right)}{\sigma \left(\frac{\Delta y}{y} / t = t_3 \right)} \right] - \Phi \left[\frac{-\delta - M \left(\frac{\Delta y}{y} / t = t_3 \right)}{\sigma \left(\frac{\Delta y}{y} / t = t_3 \right)} \right]. \quad (3.20)$$

Если процесс эксплуатации РЭУ не вызывает смещения среднего значения относительной погрешности выходного параметра, то

$$M \left(\frac{\Delta y}{y} / t = t_3 \right) = 0.$$

В этом случае формула (3.20) упрощается и примет вид

$$P_{\text{нар}}(t_3) = \Phi\left[\frac{\delta}{\sigma\left(\frac{\Delta y}{y}/t=t_3\right)}\right] - \Phi\left[\frac{-\delta}{\sigma\left(\frac{\Delta y}{y}/t=t_3\right)}\right] = 2\Phi\left[\frac{-\delta}{\sigma\left(\frac{\Delta y}{y}/t=t_3\right)}\right] - 1 \quad (3.21)$$

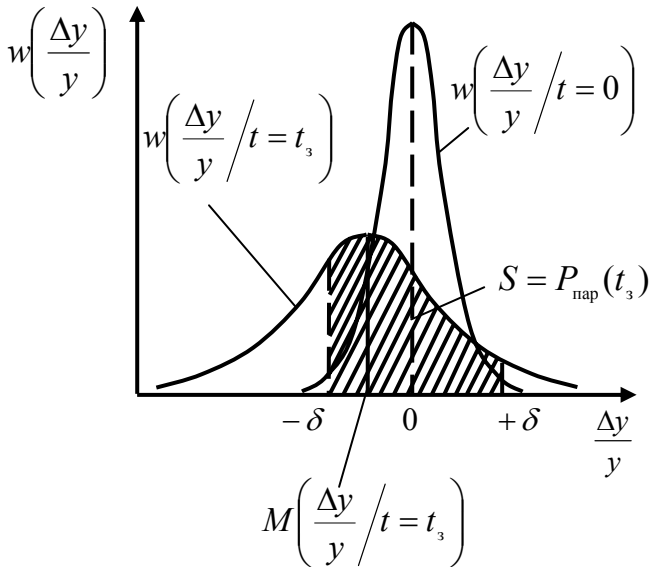


Рис. 3.8. Влияние процесса эксплуатации на распределение относительной погрешности выходного параметра

Для того, чтобы воспользоваться формулами (3.19)-(3.21), необходимо знать, насколько максимально сместится среднее значение выходного параметра или его относительной погрешности при работе РЭУ в заданных условиях эксплуатации в течение времени t_3 , т.е. характеристики $M(y/t=t_3)$ или

$M\left(\frac{\Delta y}{y}/t=t_3\right)$. Кроме этого, надо располагать сведениями о степени разброса параметра y или $\Delta y/y$ для заданных условий эксплуатации и времени t_3 т.е. характеристиками $\sigma(y/t=t_3)$ или $\sigma\left(\frac{\Delta y}{y}/t=t_3\right)$. Покажем, как оп-

ределить указанные характеристики на примере рассмотрения относительной погрешности $\Delta y/y$. Это прямо связано с расчётом эксплуатационного отклонения величины (параметра) $\Delta y/y$.

Используя формулу

$$M\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{T\pm} = \Delta T \sum_{i=1}^n B_i \cdot M(\alpha_i), \quad (3.22)$$

определяют среднее значение $\Delta y/y$, обусловленное действием температуры. Знаки \pm при нижнем индексе T означают, что эта характеристика должна подсчитываться отдельно для областей положительной (+) и отрицательной (-) температур.

По формуле

$$M\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{\text{ст}} = \Delta \tau \cdot \sum_{i=1}^n B_i \cdot M(c_i) \quad (3.23)$$

подсчитывают среднее значение $\Delta y/y$, обусловленное действием старения. В формулах (3.22), (3.23) $M(\alpha_i)$ и $M(c_i)$ — среднее значение температурного коэффициента и коэффициента старения i -го первичного параметра.

Далее определяют максимальные смещения среднего значения $\Delta y/y$ относительно среднего значения производственного допуска. Суммирование выполняют отдельно для положительных и отрицательных средних значений $M(\Delta y/y)_T$ и $M(\Delta y/y)_{\text{ст}}$, используя выражения

$$\left. \begin{aligned} M\left(\frac{\Delta y}{y} / t = t_3\right)_{\Sigma+} &= M\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{\text{пр}} + M\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{T+} + M\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{\text{ст}+}; \\ M\left(\frac{\Delta y}{y} / t = t_3\right)_{\Sigma-} &= M\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{\text{пр}} + M\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{T-} + M\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{\text{ст}-}. \end{aligned} \right\} \quad (3.24)$$

Знаки “+” и “−” подчеркивают, что выполняется суммирование положительных и отрицательных средних значений $M(\Delta y/y)_T$ и $M(\Delta y/y)_{\text{ст}}$.

Для нахождения величины $\sigma\left(\frac{\Delta y}{y} / t = t_3\right)$ подсчитывают вначале значение характеристики

$$\sigma\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{\Sigma} = \sqrt{\sigma^2\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{\text{пр}} + \sigma^2\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{T\pm} + \sigma^2\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{\text{ст}}}, \quad (3.25)$$

где $\sigma\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{\text{пр}}$ — среднее квадратическое отклонение относительной производственной погрешности;

$\sigma\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{T\pm}$ — среднее квадратическое отклонение относительной погрешности, обусловленной действием температуры;

$\sigma\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{\text{ст}}$ — среднее квадратическое отклонение относительной погрешности, вызываемой старением.

Знаки \pm при индексе T в формуле (3.25) означают, что значение $\sigma\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_T$ должно выбираться на основе анализа температурных допусков, рассчитанных для положительной и отрицательной областей температур.

Выражение (3.25) справедливо для случая, когда рассматриваются два дестабилизирующих фактора (время и температура), а также в предположении, что между указанными погрешностями отсутствует корреляция.

Расчёт $\sigma\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{\text{пр}}$ может быть выполнен с использованием выражения (4.11), приведённого в [1]. Для расчёта $\sigma\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_T$ и $\sigma\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{\text{ст}}$ можно воспользоваться формулами

$$\sigma\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_T \approx \frac{1}{3}|\Delta T| \sqrt{\sum_{i=1}^n B_i^2 \cdot \delta^2(\alpha_i)}, \quad (3.26)$$

$$\sigma\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{\text{ст}} \approx \frac{1}{3}|\Delta \tau| \sqrt{\sum_{i=1}^n B_i^2 \cdot \delta^2(c_i)}, \quad (3.27)$$

Формулы (3.26) и (3.27) записаны для случая гипотезы о нормальном распределении температурных коэффициентов α_i и коэффициентов старения c_i , а также в предположении, что корреляция между температурными коэффициентами первичных параметров отсутствует. Последнее относится и к коэффициентам старения первичных параметров.

Использование данной гипотезы в большинстве практических случаев оправдано. Если же между температурными коэффициентами первичных параметров существует корреляция, то формула (3.26) примет другой, более сложный вид

$$\sigma\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_T \approx \frac{1}{3}|\Delta T| \sqrt{\sum_{i=1}^n B_i^2 \cdot \delta^2(\alpha_i) + 2 \sum_{\substack{i,j=1 \\ i < j}}^n r_{ij} B_i B_j \delta(\alpha_i) \delta(\alpha_j)}, \quad (3.28)$$

где r_{ij} — коэффициенты парной корреляции между температурными коэффициентами i -го и j -го первичных параметров.

Запись $i < j$ в выражении (3.28) означает, что рассматриваются все неповторяющиеся сочетания пар первичных параметров, причём $i \neq j$.

В случае учёта корреляции между коэффициентами старения первичных параметров формула (3.27) должна быть дополнена слагаемым под квадратным корнем по аналогии с выражением (3.28).

Значения $M\left(\frac{\Delta y}{y} / t = t_3\right)$ и $\sigma\left(\frac{\Delta y}{y} / t = t_3\right)$, используемые в формулах (3.19)-(3.21), далее можно определить по выражениям

$$M\left(\frac{\Delta y}{y} / t = t_3\right) = \frac{M\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{\Sigma+} + M\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{\Sigma-}}{2}; \quad (3.29)$$

$$\sigma\left(\frac{\Delta y}{y} / t = t_3\right) = \sigma\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{\Sigma} + \frac{M\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{\Sigma+} - M\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{\Sigma-}}{6}. \quad (3.30)$$

Получение интересующих величин $M\left(\frac{\Delta y}{y} / t = t_3\right)$ и $\sigma\left(\frac{\Delta y}{y} / t = t_3\right)$ было показано в предположении учёта двух важнейших эксплуатационных факторов – температуры и времени(старения).

Если требуется учесть влияние двух других факторов, не принятых во внимание при расчёте, то $M\left(\frac{\Delta y}{y} / t = t_3\right)$ и $\sigma\left(\frac{\Delta y}{y} / t = t_3\right)$, определяемые по формулам (3.29) и (3.30), корректируют с помощью коэффициента запаса ξ , умножая на $\xi = 1,05 \dots 1,2$. Значение характеристик $M\left(\frac{\Delta y}{y} / t = t_3\right)$ и $\sigma\left(\frac{\Delta y}{y} / t = t_3\right)$, в том числе с учётом коэффициента запаса ξ , можно также определить на этапе расчёта эксплуатационного допуска по формуле (4.32), приводимой в учебнике [1] для получения предельных отклонений $\frac{\Delta y}{y}$:

$$\Delta_y = \xi \left\{ \left[M\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{\Sigma-} - \delta\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{\Sigma} \right] \dots \left[M\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{\Sigma} + \delta\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{\Sigma} \right] \right\}.$$

Подсчитав по этой формуле нижнее $\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_н$ и верхнее $\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_в$ предельные отклонения величины $\frac{\Delta y}{y}$, выделяют характеристики $M\left(\frac{\Delta y}{y} / t=t_3\right)$ и $\sigma\left(\frac{\Delta y}{y} / t=t_3\right)$, используемые в формулах (3.19)-(3.21):

$$M\left(\frac{\Delta y}{y} / t=t_3\right) = \frac{\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_н + \left(\frac{\Delta y}{y}\right)_в}{2}; \quad (3.31)$$

$$\sigma\left(\frac{\Delta y}{y} / t=t_3\right) = \frac{\delta\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_\Sigma + \frac{M\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{\Sigma+} + M\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{\Sigma-}}{2}}{3}. \quad (3.32)$$

На рис.3.9 заштрихованный диапазон есть поле эксплуатационного допуска с учётом

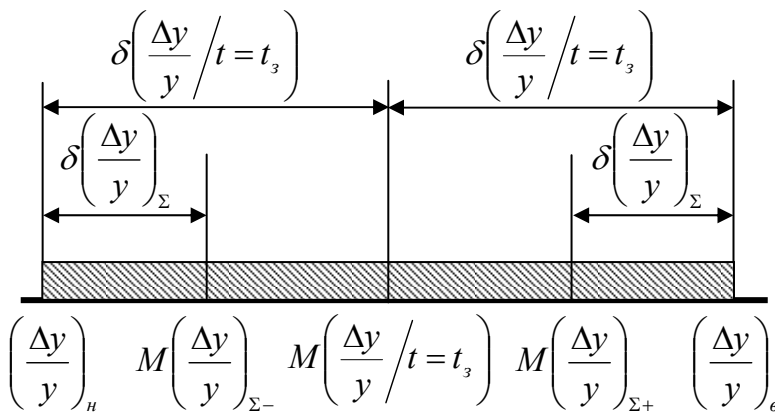


Рис .3.9. Поле эксплуатационного допуска, получаемое расчётным путём

коэффициента запаса ξ . Предполагается, что все характеристики, указанные на рис.3.9, уже пересчитаны с учётом этого коэффициента. Из рис. 3.9. понятен смысл формул (3.31) и (3.32).

Так формула (3.32) справедлива в предположении, что $\delta\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_\Sigma$ подсчитана с

гарантированной вероятностью $P_r = 0,9973$. Коэффициент гарантированного обеспечения допуска в этом случае $\rho = 1$.

Реальные РЭУ в большинстве случаев характеризуются несколькими выходными параметрами. В этих случаях для определения вероятности, с которой гарантируется отсутствие постепенных отказов, можно воспользоваться выражением

$$P_{\text{пар } \Sigma(t_3)} = \prod_{j=1}^L P_{\text{пар } j(t_3)}, \quad (3.33)$$

где $P_{\text{пар } j(t_3)}$ – вероятность отсутствия постепенного отказа по j -му выходному параметру;

L – количество выходных параметров, которыми характеризуется параметрическая надёжность РЭУ.

Выражение (3.33) записано в предположении, что постепенные отказы по разным выходным параметрам РЭУ независимы.

Пример 3.3. Для делителя напряжения, рассмотренного в разд.4.5-4.6 [1], определить вероятность, с которой гарантируется отсутствие постепенного отказа. Заданное время работы делителя $t_3 = 10000$ ч. Диапазон рабочих температур $+10..+50$ °С. Параметры резисторов: $R1 = 3 \text{ кОм} \pm 10\%$, $R2 = 2 \text{ кОм} \pm 10\%$. Типы резисторов – МЛТ. Условие отсутствия постепенного отказа: $\Delta q/q \leq \pm 5\%$. Зависимость выходного параметра (коэффициента деления q) от первичных параметров ($R1$ и $R2$) задается моделью

$$q = \frac{R1 + R2}{R2}.$$

Решение. 1. Значения коэффициентов влияния, подсчитанные по формуле (4.9) [1], равны: $B_{R1} = 0,6$; $B_{R2} = -0,6$.

В примере 4.3 (подразд.4.6.3 [1]) получено

$$M\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{\text{пр}} = M\left(\frac{\Delta q}{q}\right)_{\text{пр}} = 0.$$

3. Для подсчета значения $\sigma(\Delta q/q)_{\text{пр}}$ воспользуемся выражением (4.11) [1], однако вначале по правилу “трех сигм” определим значения $\sigma(\Delta R_i/R_i)$. Получим:

$$\sigma\left(\frac{\Delta R1}{R1}\right) \approx \frac{\delta\left(\frac{\Delta R1}{R1}\right)}{3} = \frac{10}{3} \approx 3,3\%.$$

Аналогично

$$\sigma\left(\frac{\Delta R2}{R2}\right) \approx 3,3\%.$$

Тогда

$$\sigma\left(\frac{\Delta q}{q}\right)_{\text{пр}} = \sqrt{0,6^2 \cdot 3,3^2 + (-0,6)^2 \cdot 3,3^2} \approx 2,8\%.$$

4. Вероятностное описание температурных коэффициентов и коэффициентов старения, полученное на основе анализа справочной информации[12]:

$$M(\alpha_R) = 0; \quad \delta(\alpha_R) = 7 \cdot 10^{-2} \% 1/^\circ\text{C} \text{ при } T = +20 \dots +100^\circ\text{C};$$

$$M(\alpha_R) = 0; \quad \delta(\alpha_R) = 12 \cdot 10^{-2} \% 1/^\circ\text{C} \text{ при } T = +20 \dots -60^\circ\text{C};$$

$$M(C_R) = 3 \cdot 10^{-4} \% 1/\text{час}; \quad \delta(C_R) = 2 \cdot 10^{-4} \% 1/\text{час}.$$

5. Определим значение величины $M(\Delta q/q)_T$ для положительной и отрицательной областей температур:

$$M\left(\frac{\Delta q}{q}\right)_{T+} = M\left(\frac{\Delta q}{q}\right)_{T-} = 0, \text{ так как } M(\alpha_R) = 0.$$

6. Принимая гипотезу о нормальном распределении температурных коэффициентов и учитывая, что эти коэффициенты некоррелированы (так как резисторы делителя дискретные), по формуле (3.26) подсчитаем значения $\sigma(\Delta q/q)_T$ для положительной (+) и отрицательной (—) областей температур. Получим:

$$\sigma\left(\frac{\Delta q}{q}\right)_{T+} = \frac{1}{3} \sqrt{0,6^2 \cdot (7 \cdot 10^{-2})^2 + (-0,6)^2 \cdot (7 \cdot 10^{-2})^2} \cdot (50 - 20) \approx 0,6\%;$$

$$\sigma\left(\frac{\Delta q}{q}\right)_{T-} = \frac{1}{3} \sqrt{0,6^2 \cdot (12 \cdot 10^{-2})^2 + (-0,6)^2 \cdot (12 \cdot 10^{-2})^2} \cdot |10 - 20| \approx 0,34\%.$$

Для дальнейших расчётов выбираем большее значение

$$\sigma\left(\frac{\Delta q}{q}\right)_T = 0,6\%.$$

7. Определяем $M(\Delta q/q)_{\text{ст}}$ по формуле(3.23):

$$M\left(\frac{\Delta q}{q}\right)_{\text{ст}} = 10000 \cdot [0,6 \cdot 3 \cdot 10^{-4} + (-0,6) \cdot 3 \cdot 10^{-4}] = 0$$

8. Принимая гипотезу о нормальном распределении коэффициентов старения и учитывая, что эти коэффициенты некоррелированы, по выражению (3.27) подсчитаем $\sigma(\Delta q/q)_{\text{ст}}$.

$$\sigma\left(\frac{\Delta q}{q}\right) = \frac{1000}{3} \cdot \sqrt{0,6^2 \cdot (2 \cdot 10^{-4})^2 + (-0,6)^2 \cdot (2 \cdot 10^{-4})^2} \approx 0,57\%.$$

9. С учётом выражения (3.29) и того, что $M\left(\frac{\Delta q}{q}\right)_{\Sigma+} = M\left(\frac{\Delta q}{q}\right)_{\Sigma-} = 0$, получим

$$M\left(\frac{\Delta q}{q} / t = t_3\right) = 0.$$

Это означает, что в данном случае не наблюдается смещения центра рассеивания относительной погрешности выходного параметра q .

10. Предположим, что между погрешностями, обусловленными производственными причинами, старением и действием температуры, отсутствует корреляция. Тогда для определения $\sigma\left(\frac{\Delta q}{q}\right)_{\Sigma}$ можно использовать формулу (3.25). С учётом того, что $M\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{\Sigma+} = 0$ и $M\left(\frac{\Delta q}{q}\right)_{\Sigma+} = M\left(\frac{\Delta q}{q}\right)_{\Sigma-} = 0$, по выражению (3.30) получаем

$$\sigma\left(\frac{\Delta y}{y} / t = t_3\right) = \sigma\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{\Sigma} = \sqrt{2,8^2 + 0,6^2 + 0,57^2} \approx 2,92\%.$$

11. По условию примера $\delta(\Delta q/q) = 5\%$. Определяем вероятность, с которой гарантируется отсутствие постепенного отказа. С учётом замечания, сделанного в п.9, применяем формулу (3.21). Получаем

$$P_{\text{нар}}(t_3) = 2\Phi\left(\frac{5}{2,92}\right) - 1 \approx 1,914 - 1 = 0,914.$$

При расчёте использована табл.П1.1, прил.1.

Вероятность того, что в заданных условиях эксплуатации и течение времени $t=t_3$ произойдет постепенный отказ, определится как

$$q_{\text{пар}}(t_3) = 1 - P_{\text{пар}}(t_3) = 1 - 0,914 = 0,086.$$

Это означает, что при эксплуатации делителей в заданных условиях в течение промежутка времени $t_3 = 10000$ ч в среднем из каждых 100 делителей лишь у 8-9 экземпляров выходной параметр (коэффициент деления q) выйдет за пределы $\Delta q/q_{\text{ном}} = \pm 5\%$.

Номинальное значение коэффициента деления $q_{\text{ном}}$ определится как

$$q_{\text{ном}} = \frac{R1_{\text{ном}} + R2_{\text{ном}}}{R2_{\text{ном}}} = \frac{3 + 2}{2} = 2,5,$$

где $R1_{\text{ном}}, R2_{\text{ном}}$ — номинальные значения первичных параметров — сопротивлений резисторов $R1$ и $R2$.

3.9. Упрощенная оценка уровня параметрической надёжности устройств

С понятием параметрическая надёжность устройства прямо связаны постепенные отказы устройства по его функциональным параметрам. Если хотя бы один из функциональных параметров устройства y вышел за пределы норм, указанных в документации,

$$y_{\min} \leq y \leq y_{\max}, \quad (3.34)$$

то считают, что наступил постепенный отказ.

В условии (3.34) y_{\min}, y_{\max} — нижняя и верхняя границы, указанные в технической документации.

В качестве количественной характеристики **параметрической надёжности** РЭУ, как отмечалось ранее, обычно используют вероятность, с которой гарантируется отсутствие постепенного отказа, т.е. вероятность того, что функциональные параметры будут отвечать условию (3.34). Причём, это условие должно выполняться в заданных условиях эксплуатации и в течение заданного времени t_3 .

Поясним принцип упрощённого расчёта вероятности вида

$$P_{\text{пар}}(t_3) = P(y_{\min} \leq y \leq y_{\max})$$

на примере одного функционального параметра y .

Отметим, что причинами, вызывающими появление постепенного отказа по рассматриваемому функциональному параметру y являются следующие:

1. Производственный разброс функционального параметра y (дает себя знать при $t = 0$).
2. Изменение y под воздействием факторов окружающей среды.
3. Изменение y из-за процессов деградации, возникающих в течение заданного времени t_3 .

При оценке вероятности вида $P_{\text{пар}}(t_3)$ пользуются гипотезой о нормальном законе распределения y (рис. 3.10).

С учётом гипотезы о нормальном законе распределения выходного параметра y

$$P_{\text{пар}}(t_3) = P(y_{\text{н}} \leq y \leq y_{\text{в}}) = \left| P(a \leq x \leq b) = \Phi\left(\frac{b-m}{\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{a-m}{\sigma}\right) \right| =$$

$$a = y_{\text{н}}; b = y_{\text{в}}; m = y_{\text{ном}}; \sigma = \sigma_y$$

$$= \Phi\left(\frac{y_{\text{в}} - y_{\text{ном}}}{\sigma_y}\right) - \Phi\left(\frac{y_{\text{н}} - y_{\text{ном}}}{\sigma_y}\right),$$

где $w(y/t=0)$ – плотность распределения выходного параметра y в момент времени $t=0$ и без учета действия факторов окружающей среды при эксплуатации;

$w(y/t = t_3)$ – плотность распределения выходного параметра y на момент времени $t = t_3$ с учётом действия факторов окружающей среды при эксплуатации.

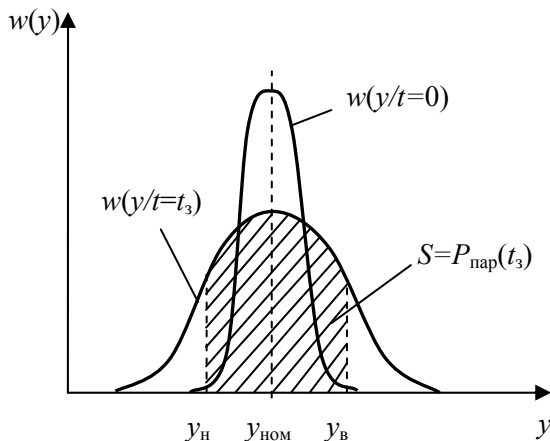


Рис.3.10. Изменение рассеивания выходного параметра при эксплуатации РЭУ

$$\sigma_y = \sigma(y/t = t_3),$$

где σ_y – среднее квадратическое отклонение выходного параметра в момент времени $t = t_3$ с учётом действия факторов окружающей среды при эксплуатации.

Величина σ_y может быть найдена приёмами, рассмотренными в учебной дисциплине «Прикладная математика».

Раздел 4. РЕЗЕРВИРОВАНИЕ КАК МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ НАДЁЖНОСТИ РЭУ

4.1. Понятие эксплуатационной надёжности РЭУ

Надёжность РЭУ закладывается на этапе проектирования, должна обеспечиваться на этапе производства и поддерживаться на этапе эксплуатации.

Надёжность, которую РЭУ показывают в процессе эксплуатации, называют **эксплуатационной надёжностью**. Опыт эксплуатации РЭУ показывает, что эксплуатационная надёжность практически всегда ниже того уровня, который получается по результатам расчёта при проектировании устройства. Объясняется это как явными ошибками проектирования и несовершенством технологии производства, так и низкой достоверностью справочных данных о надёжности элементов.

Изложенные ранее методики оценки показателей надёжности РЭУ дают приемлемые для практики результаты в случае выполнения для элементов принципа статистической устойчивости показателей надёжности. Этот принцип означает, что для элементов данного типа, независимо от партий или времени их выпуска, должны сохраняться статистические значения показателей надёжности, а именно:

$$M(\lambda_i) = \text{const};$$

$$\sigma(\lambda_i) = \text{const},$$

где M, σ — знаки математического ожидания и среднего квадратического отклонения;

i — номер партии элемента данного типа.

В условиях относительно совершенных технологических процессов и высокой культуры производства этот принцип, как правило, выполняется.

4.2. Общая характеристика методов повышения надёжности РЭУ

Все методы повышения надёжности РЭУ можно условно разбить на две группы методов: схмотехнические и конструкторско-технологические.

Основные методы первой группы:

1. Выбор электрических принципиальных схем, содержащих минимальное число элементов.

2. Выбор электрических принципиальных схем, выходные характеристики которых слабо зависят от изменения напряжения питания и разброса параметров элементов.

Это позволяет в значительной степени повысить параметрическую надёжность, т.е. свести к минимуму постепенные отказы.

3. Выбор электрических принципиальных схем, устойчивых к воздействию дестабилизирующих факторов, особенно температуры.

Среди методов второй группы необходимо отметить следующие:

1. Правильный выбор коэффициентов электрической нагрузки элементов. Замечено, что для большинства элементов оптимальные значения коэффициентов электрической нагрузки близки к числам 0,3...0,6. Их снижение повышает надёжность элементов, однако ведёт, как правило, к увеличению массы, габаритов, стоимости устройства. Кроме того, чрезмерное уменьшение коэффициентов электрической нагрузки может вызвать нестабильную работу ряда элементов, в частности полупроводниковых приборов.

2. Отбраковка потенциально ненадёжных элементов в условиях производства РЭУ. Используют как электротермотренировку, так и методы индивидуального прогнозирования надёжности элементов.

3. Защита элементов РЭУ от воздействия факторов окружающей среды.

Особую группу методов составляет повышение надёжности путём резервирования.

Подробное рассмотрение методов повышения надёжности РЭУ является предметом рассмотрения раздела 5.

При изучении методов повышения надёжности элементов и РЭУ читатель может также использовать работы [1, 3, 10, 11].

В данном разделе рассматривается резервирование, его виды и методы оценки показателей безотказности устройств при наличии резервирования.

4.3. Общая характеристика резервирования

Резервирование – это введение в структуру устройства дополнительного числа элементов, цепей и (или) функциональных связей по сравнению с минимально необходимыми для функционирования устройства. Цель резервирования – повышение надёжности устройства.

В зависимости от того, как подключаются резервные элементы в случае отказа основных, различают следующие виды резервирования:

- 1) постоянное;
- 2) замещением;
- 3) скользящее (может рассматриваться как частный случай резервирования замещением).

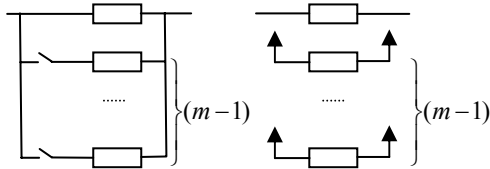


Рис.4.1. Схематическое изображение резервирования замещением:
 $(m-1)$ – количество резервных элементов

При постоянном резервировании резервные элементы постоянно подключены к основным и находятся в одинаковом с ними электрическом режиме. Деление элементов на основные и резервные носит здесь условный характер.

При резервировании замещением основной элемент в случае его отказа отключается от электрической схемы, обычно как по выходу, так и по входу,

и вместо него подключается один из резервных элементов.

Переключение может выполняться либо автоматически с помощью переключающих устройств, либо вручную. Условно резервирование замещением изображается одним из способов, указанных на рис.4.1.

Скользящее резервирование – это резервирование замещением, при котором любой резервный элемент может замещать любой основной элемент. Это возможно лишь при их однотипности.

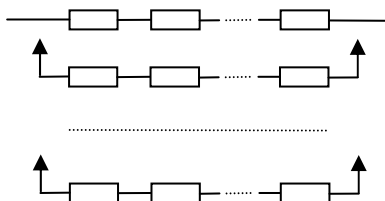


Рис.4.2. Общее резервирование

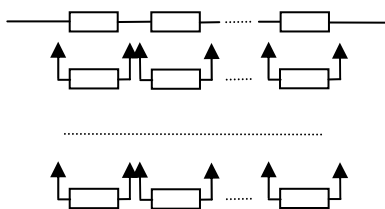


Рис.4.3. Раздельное (поэлементное) резервирование

При рассмотрении резервирования под словом "элемент" следует понимать как комплектующий элемент, так и каскад, функциональный узел, блок и т.д., имея в виду, что резервирование может выполняться на уровне различных частей РЭС.

В зависимости от того, какая часть РЭС резервируется, различают общее (рис.4.2) и раздельное (поэлементное) резервирование (рис.4.3).

При общем резервировании резервируется устройство в целом. При раздельном резервировании РЭУ резервируется по частям.

4.4. Характеристика постоянного резервирования

При постоянном резервировании деление элементов на основные и резервные носит условный характер. Различают следующие способы соединения элементов резервируемого узла:

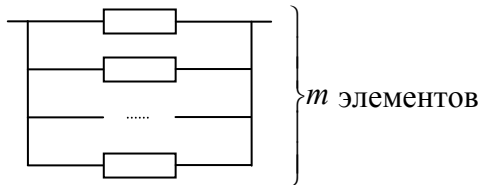


Рис.4.4. Параллельный способ соединения элементов резервируемого узла

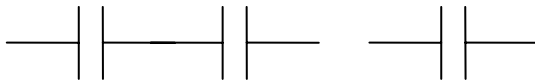


Рис.4.5. Последовательный способ соединения элементов резервируемого узла

1. Параллельный (рис.4.4).

Такой способ соединения используется в случае преобладания отказов типа "обрыв" (например, для резисторов).

2. Последовательный (рис.4.5).

Этот способ применяется тогда, когда преобладают отказы типа "короткое замыкание" (например, для конденсаторов).

3. Смешанный (рис.4.6).

Такой способ применяется тогда, когда отказы типа "обрыв"

и типа "короткое замыкание" примерно равновероятны, например, для полупроводниковых диодов.

На практике рассматриваемое постоянное резервирование используют тогда, когда между какими-то точками электрической схемы необходимо обеспечить наличие определенных свойств (резистивных, емкостных, проводящих, усилительных и т.д.), а количественное значение характеристики, описывающей эти свойства, не играет принципиальной роли.

Основными достоинствами постоянного резервирования являются: простота технической реализации и отсутствие даже кратковременного перерыва в работе в случае отказа элементов резервируемого узла. Это особенно важно для вычислительной техники и устройств цифровой обработки информации.

Основные недостатки постоянного резервирования:

1) меньший выигрыш в надёжности по сравнению с резервированием замещением;

2) изменение электрического режима работы элементов резервируемого узла при отказе хотя бы одного из элементов;

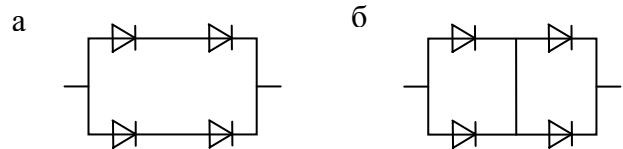


Рис.4.6. Примеры смешанного соединения элементов резервируемого узла:

а) - последовательно-параллельная схема;

б) - параллельно-последовательная схема

3) отказ резервируемого узла в целом при замыкании одного из элементов в случае параллельного способа соединения элементов в узле;

4) отказ резервируемого узла в целом при обрыве одного из элементов в случае последовательного соединения элементов в узле.

Рассматриваемое постоянное резервирование на практике обычно выполняется на уровне комплектующих элементов и каскадов.

4.5. Оценка показателей безотказности устройства при наличии постоянного резервирования

Анализ безотказности выполняют, основываясь на том, что для каждого элемента резервируемого узла справедливо выражение

$$p + q_o + q_{кз} = 1, \quad (4.1)$$

где p – вероятность безотказной работы;

q_o – вероятность отказа типа “обрыв”;

$q_{кз}$ – вероятность отказа типа “короткое замыкание”.

Предполагается, что вероятности p , q_o , $q_{кз}$, соответствующие элементу, подсчитываются для одного и того же заданного времени t_3 , т. е.

$$p = p(t_3); \quad q_o = q_o(t_3); \quad q_{кз} = q_{кз}(t_3).$$

Выражение (4.1) означает, что в любой момент времени элемент либо исправен, либо имеет отказ типа “обрыв”, или отказ типа “короткое замыкание”. Указанные три состояния являются несовместными и образуют полную группу событий.

Покажем приём анализа безотказности на примере параллельного способа соединения двух элементов резервируемого узла (рис.4.7).

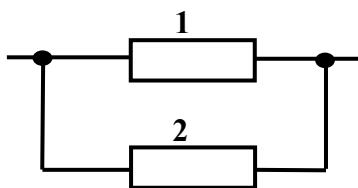


Рис.4.7. Параллельное соединение элементов

Будем предполагать, что элементы резервируемого узла идентичны и имеют характеристики p , q_o , $q_{кз}$.

Рассмотрим состояния, благоприятствующие безотказной работе этого резервируемого узла. Всего состояний резервируемого узла девять ($3^2=9$), так как элемент имеет три состояния, а всего элементов два (см. рис.4.7).

Из девяти состояний благоприятствующими безотказной работе узла в целом будут лишь три (табл.4.1).

Таблица 4.1

Состояния резервируемого узла,
благоприятствующие его безотказной работе

Номер состояния	Элемент 1	Элемент 2
1	p	p
2	p	q_o
3	q_o	p

В табл.4.1 знаком p обозначено исправное состояние элемента, знаком q_o – состояние, соответствующее отказу типа “обрыв”.

Так как указанные состояния являются несовместными, то вероятность безотказной работы резервируемого узла в целом может быть подсчитана как сумма вероятностей этих состояний, т.е.

$$P_{1,2}^{\text{пар}}(t_3) = pp + pq_o + q_op = p^2 + 2pq_o. \quad (4.2)$$

Если далее рассматривать в составе резервируемого узла три, четыре и т.д. элементов, то можно прийти к формуле вида

$$P_{1,2,\dots}^{\text{пар}}(t_3) = \sum_{j=0}^{m-1} C_m^{m-j} p^{m-j} q_o^j \quad (4.3)$$

где m – общее число элементов резервируемого узла;

C_m^{m-j} – биномиальные коэффициенты формулы Ньютона (коэффициенты бинома Ньютона).

Эти коэффициенты могут быть вычислены по формуле

$$C_m^{m-j} = \frac{m!}{(m-j)!j!}. \quad (4.4)$$

Следует знать, что

$$C_m^{m-j} = C_m^j,$$

поэтому в формуле (4.3) величина C_m^{m-j} может быть заменена на величину C_m^j .

При использовании формулы (4.4) нужно помнить, что $0!=1$.

В случае последовательного способа соединения элементов резервируемого узла формула для подсчёта вероятности безотказной работы резервируемого узла примет вид

$$P_{1,2,\dots}^{\text{посл}}(t_3) = \sum_{j=0}^{m-1} C_m^{m-j} p^{m-j} q_{\text{кз}}^j \quad (4.5)$$

Нетрудно увидеть, что формула (4.5) получается из формулы (4.3) путём замены вероятности q_0 на вероятность $q_{кз}$.

При смешанном способе соединения элементов резервируемого узла анализ безотказности зависит от конкретной схемы соединения элементов.

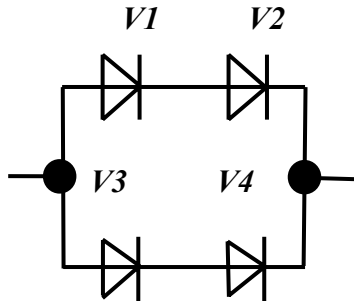


Рис. 4.8 Смешанный способ соединения диодов резервируемого узла (последовательно-параллельная схема)

Покажем, как выполнять анализ безотказности на примере смешанного способа соединения элементов (рис.4.8).

Будем предполагать, что диоды резервируемого узла одинаковы и имеют следующие значения характеристик p , q_0 , $q_{кз}$ для времени t_3 :

$$p(t_3) = p = 0,8;$$

$$q_0(t_3) = q_0 = 0,1;$$

$$q_{кз}(t_3) = q_{кз} = 0,1.$$

Рассматривая схему соединения диодов (см. рис. 4.8), можно увидеть, что две последовательные цепочки соединены между собой параллельно, отсюда и название схемы: последовательно-параллельная.

В литературе [6] описывается приём анализа, основанный на рассмотрении состояний резервируемого узла. Так, в данном примере узел будет иметь $3^4=81$ состояние, ибо каждый диод может принять одно из трех состояний, а в узле соединено четыре элемента.

Но из 81 состояния безотказной работе узла в целом благоприятствуют только 39 [6]. Поэтому можно указать эти состояния, а затем вероятность безотказной работы узла найти как сумму их вероятностей. Однако такой путь длинный, легко допустить неточность. Поэтому предлагается другой, более рациональный, способ.

Суть его состоит в следующем. Вначале диоды последовательной цепочки сворачиваются в один эквивалентный (рис.4.9), причём он будет иметь свои характеристики, а именно $p_{э}$, $q_0_{э}$, $q_{кз_{э}}$.

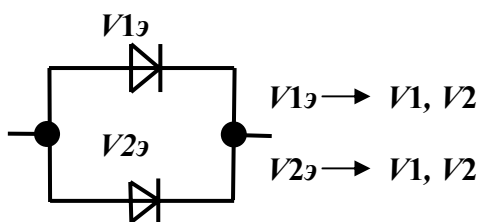


Рис. 4.9. Свёртка диодов последовательных цепочек в эквивалентный диод

Предположим, что показатели безотказности эквивалентного диода $p_{э}$, $q_0_{э}$, $q_{кз_{э}}$ каким-либо образом найдены. Тогда задача определения вероятности безотказной работы исходного узла (см. рис. 4.8) сводится к ранее рассмотренной задаче – параллельному соединению элементов резервируемого узла (см. рис. 4.9). Применим изложенный подход к рассматриваемому примеру (см. рис.4.8).

Применяя формулу (4.5) для случая двух последовательно соединенных элементов, найдем вероятность безотказной работы эквивалентного диода. Получим

$$p_{\text{э}} = p^2 + 2pq_{\text{кз}} = 0,8^2 + 2 \cdot 0,8 \cdot 0,1 = 0,8.$$

Далее определим для эквивалентного диода характеристики $q_{\text{оэ}}$, $q_{\text{кзэ}}$. Нетрудно установить, что для последовательного соединения только одно состояние благоприятствует отказу цепочки по типу “короткое замыкание”, а именно – отказ данного типа обоих диодов последовательной цепочки. Поэтому

$$q_{\text{кзэ}} = q_{\text{кз}} \cdot q_{\text{кз}} = q_{\text{кз}}^2 = 0,1^2 = 0,01.$$

Значение характеристики $q_{\text{оэ}}$ найдем, пользуясь соотношением (4.1). Получим

$$q_{\text{оэ}} = 1 - (p_{\text{э}} + q_{\text{кзэ}}) = 1 - (0,8 + 0,01) = 0,19.$$

Окончательно вероятность безотказной работы всего резервируемого узла (см. рис.4.8) определим, пользуясь рис. 4.9 и формулой (4.3), или ее реализацией (4.2) для случая двух параллельно соединенных элементов.

$$P_{\Sigma}(t_3) = P_{V1_{\text{э}}, V2_{\text{э}}}^{(\text{пар})}(t_3) = p_{\text{э}}^2 + 2p_{\text{э}}^2 q_{\text{оэ}} = 0,8^2 + 2 \cdot 0,8 \cdot 0,19 = 0,944.$$

В случае соединения элементов по параллельно-последовательной схеме выполняется свертка в эквивалентный элемент цепочек из параллельно соединенных элементов (рис.4.10).

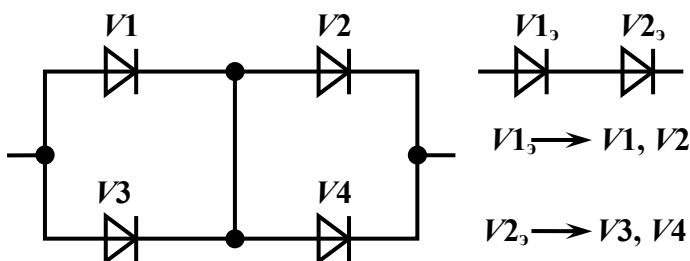


Рис.4.10. Параллельно-последовательная схема соединения элементов резервируемого узла и ее свертка

Анализ безотказности в этом случае аналогичен вышерассмотренному примеру.

Заканчивая рассмотрение анализа безотказности устройств при наличии постоянного резервирования, заметим, что при таком резервировании характер отказов элементов играет принципиальную роль с точки зрения безотказности устройств в целом и обязательно должен приниматься во внимание.

4.6. Характеристика резервирования замещением

При резервировании замещением основной элемент в случае его отказа отключается от электрической схемы, и вместо него подключается один из резервных элементов. Для подключения резервного элемента используется переключающее устройство. Такие устройства могут работать в автоматическом режиме либо быть ручными.

Основной характеристикой резервирования замещением является кратность резерва [1, 2], выражаемая несокращенной дробью и определяемая отношением

$$R = \frac{r}{n}, \quad (4.6)$$

где r – количество резервных элементов, способных замещать основные элементы данного типа; $r = m - n$ (см. рис.4.2);

n – количество основных элементов, резервируемых резервными элементами.

Примеры оценки кратности резерва понятны из рис.4.11.

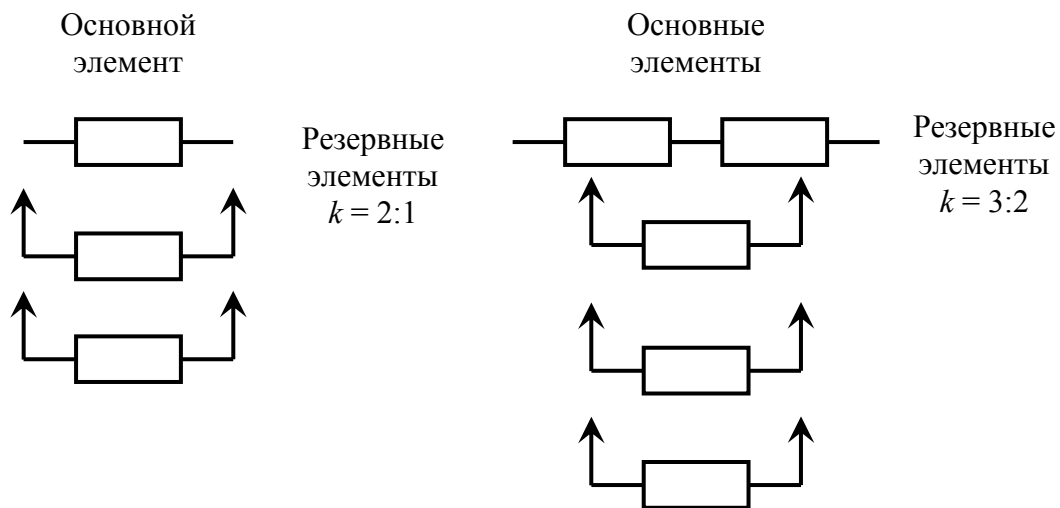


Рис.4.11. Примеры оценки кратности резерва

Из рис.4.11 видно, что дробь, описывающую кратность резерва, нельзя сокращать, так как будет потеряна информация о характеристиках резервирования.

Резервирование с кратностью резерва один к одному называют дублированием.

При резервировании замещением резервные элементы до вступления их в работу могут находиться в одном из трёх режимов нагружения:

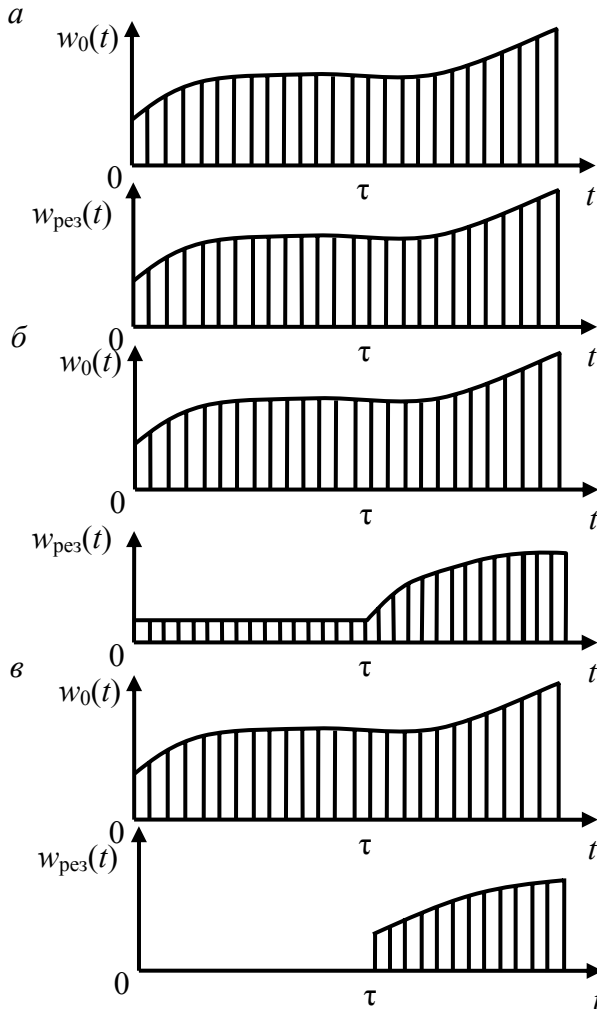


Рис.4.12. Плотность распределения времени безотказной работы резервируемой аппаратуры:

- а – нагруженный резерв;**
- б – облегченный резерв;**
- в – ненагруженный резерв**

а) в нагруженном режиме. В этом случае говорят о нагруженном резерве или “горячем” резервировании. Здесь резерв находится в таком же электрическом режиме, как и основной элемент, и его ресурс вырабатывается одновременно с ресурсом основного элемента, точно так же, как и при постоянном резервировании (рис.4.12,а);

б) в облегченном режиме. В этом случае говорят об облегченном резерве или “теплом” резервировании. Ресурс резервных элементов начинает расходоваться с момента включения всего устройства в работу, однако интенсивность расхода ресурса резервных элементов до момента включения их вместо отказавших (время τ) значительно ниже, чем в обычных рабочих условиях (рис.4.12,б).

в) в ненагруженном режиме. В этом случае говорят о ненагруженном резерве или “холодном” резервировании. При этом условия, в которых находится резерв, настолько легче рабочих, что практически резервные элементы начинают расходовать свой ресурс только с момента включения их в работу вместо отказавших (рис.4.12,в).

Основные достоинства резервирования замещением:

- 1) большой выигрыш в надёжности по сравнению с постоянным резервированием (в случаях ненагруженного и облегченного резерва);
- 2) отсутствие необходимости дополнительной регулировки в случае замещения основного элемента резервным, так как основной и резервный элементы одинаковы.

Основные недостатки резервирования замещением:

- 1) сложность технической реализации и связанное с этим увеличение массы, габаритов и стоимости всего резервируемого РЭУ;
- 2) перерыв в работе в случае замещения отказавшего элемента;
- 3) необходимость иметь переключающее устройство высокой надёжности. Для обеспечения этого иногда приходится резервировать сами переключающие устройства, обычно используя постоянное резервирование. На практике считается, что надёжность переключающего устройства должна быть, по меньшей мере, на порядок выше надёжности резервируемого элемента.

4.7. Анализ безотказности РЭУ при наличии резервирования замещением (нагруженный резерв)

При анализе следует иметь в виду, что характер отказов элементов при резервировании замещением не играет никакой роли, так как отказавший элемент отключается от электрической схемы и вместо него подключается исправный.

Методы анализа безотказности зависят от того, в каком режиме нагружения находится резерв. Рассмотрим приёмы анализа безотказности устройств в случае нагруженного резерва, проиллюстрировав их на примере.

Пример 4.1 Пусть схема (модель) расчёта надёжности имеет вид, показанный на рис.4.13.

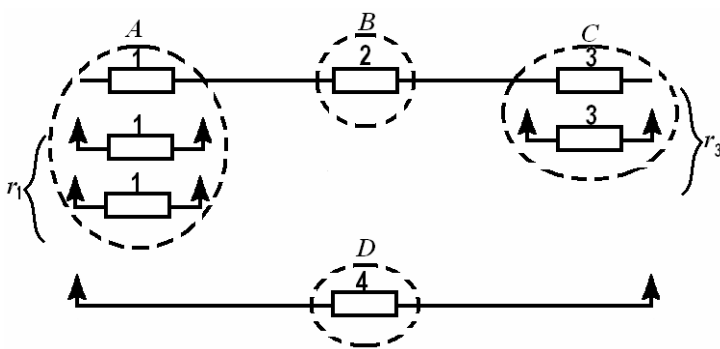


Рис.4.13. Схема расчёта надёжности

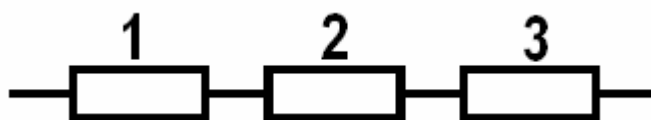


Рис. 4.14. Структура элемента 4

Будем считать, что основной и резервные элементы одинаковы, а элемент 4 имеет минимальную функционально необходимую структуру, т.е. эквивалентен цепочке, показанной на рис. 4.14.

Предположим, что для заданного времени работы устройства t_3 известны вероятности безотказной работы элементов 1, 2, 3:

$$\begin{aligned} p_1(t_3) &= p_1 = 0,6; \\ p_2(t_3) &= p_2 = 0,95; \\ p(t_3) &= p_3 = 0,8. \end{aligned}$$

Решение. Из рис.4.13 видно, что устройство состоит из узла A (который представляет собой резервируемую структуру с кратностью резерва два к одному), узла B (нерезервируемый элемент), узла C , (резервируемая структура с кратностью резерва один к одному) и узла D (резервный элемент для устройства в целом).

1. Определим вероятность безотказной работы элемента 4, помня, что с точки зрения надёжности он состоит из трех последовательно соединенных элементов.

С использованием основного расчётного соотношения (3.1) можно определить вероятность безотказной работы элемента 4:

$$p_4 = p_1 \cdot p_2 \cdot p_3 = 0,6 \cdot 0,95 \cdot 0,8 \approx 0,46.$$

2. Рассмотрим узел A . Вначале определим вероятность отказа элемента 1. Получим

$$q_1 = 1 - p_1 = 1 - 0,6 = 0,4.$$

Нетрудно понять, что отказ узла A в целом произойдет тогда, когда откажут как основной элемент, так и два резервных. Вероятность этого события может быть подсчитана как

$$q_A = q_1 \cdot q_1 \cdot q_1 = q_1^3 = 0,4^3 = 0,064.$$

Здесь и далее считаем надёжность переключающих устройств идеальной, т.е. $P_{\text{перекл}} = 1$. В случае произвольного числа резервных элементов r вероятность отказа резервируемого узла подсчитывается по формуле

$$q_y = q^{r+1}.$$

3. Рассмотрим узел C . Определим вероятность отказа элемента типа 3:

$$q_3 = 1 - p_3 = 1 - 0,8 = 0,2.$$

Подсчитаем вероятность отказа узла C , получим

$$q_C = q_3^{r_3+1} = q_3^2 = 0,2^2 = 0,04.$$

4. Подсчитаем вероятность безотказной работы устройства, состоящего из узлов A , B , C . Вначале определим вероятность безотказной работы каждого из них:

$$p_A = 1 - q_A = 1 - 0,064 = 0,936;$$

$$q_B = p_2 = 0,95;$$

$$p_C = 1 - q_C = 1 - 0,04 = 0,96.$$

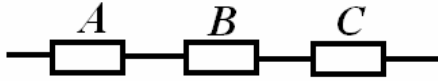


Рис.4.15. Соединение узлов A, B, C

Узлы A, B, C с точки зрения надёжности соединены последовательно (рис.4.15).

Следовательно, используя основное расчётное соотношение, их общую вероятность безотказной работы можно определить как

$$p_{ABC} = p_A \cdot p_B \cdot p_C = 0,936 \cdot 0,95 \cdot 0,96 \approx 0,85.$$

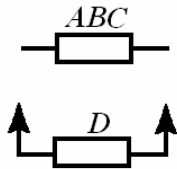


Рис.4.16. Соединение узлов ABC и D

5. Подсчитаем вероятность безотказной работы устройства в целом (с учётом узла D). Узел D резервирует узлы A, B, C , что схематически изображено на рис.4.16.

Нетрудно понять, что отказ устройства в целом наступит при отказе как структуры ABC , так и узла D . Следовательно,

$$\begin{aligned} q_{РЭУ} &= q_{ABC} \cdot q_D = q_{ABC} \cdot q_4 = \\ &= (1 - p_{ABC}) \cdot (1 - p_4) = \\ &= (1 - 0,85)(1 - 0,46) = 0,15 \cdot 0,54 \approx 0,08. \end{aligned}$$

Тогда

$$p_{РЭУ} = 1 - q_{РЭУ} = 1 - 0,08 = 0,92.$$

Заметим, что в случае отсутствия какого-либо резервирования данного РЭУ вероятность безотказной работы была бы равна значению 0,46.

Раздел 5. ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЁЖНОСТИ УСТРОЙСТВ НА ЭТАПАХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ, ПРОИЗВОДСТВА И ЭКСПЛУАТАЦИИ

5.1. Общая характеристика методов повышения надёжности РЭС на этапе проектирования

Известно, что надёжность РЭУ закладывается на этапе проектирования. Если будет заложен недостаточный уровень надёжности, то этапы изготовления (производства) и эксплуатации задачу обеспечения надёжности не решат.

Основными методами, обеспечивающими требования к показателям надёжности на этапе проектирования, являются следующие:

1. Удачность конструктивного исполнения РЭУ (удачность компоновки).
2. Выбор для конструкции высоконадёжных комплектующих элементов и изделий и защита их от воздействия дестабилизирующих факторов.
3. Правильный выбор элементов с точки зрения их устойчивости и стойкости к действию факторов окружающей среды. Очень важно обеспечить какие-то запасы по температуре, уровню механических воздействий и т.д.
4. Правильный выбор электрических режимов работы элементов. Недопустимо использовать элементы с коэффициентом электрической нагрузки $K_n > 1$.
5. Правильный выбор материалов конструкции. Старение материалов должно быть таким, чтобы их долговечность (ресурс, срок службы) отвечала требованиям надёжности.
6. Использование для изготовления конструкции проверенных совершенных технологических процессов.
7. Правильный (удачный) выбор электрических схем.
8. Использование резервирования. Его можно рассматривать как крайнюю меру, так как резервирование наряду с повышением надёжности ухудшает целый ряд других показателей качества (увеличиваются габариты, масса, стоимость).

5.2. Априорное (начальное) ограничение нагрузки элементов как метод повышения надёжности РЭУ

Экспериментально установлено, что зависимость интенсивности отказов элементов λ от коэффициента нагрузки K_n при фиксированной температуре t носит явно нелинейный характер. Например,

применительно к резисторам постоянного сопротивления зависимость имеет вид, показанный на рис.5.1.

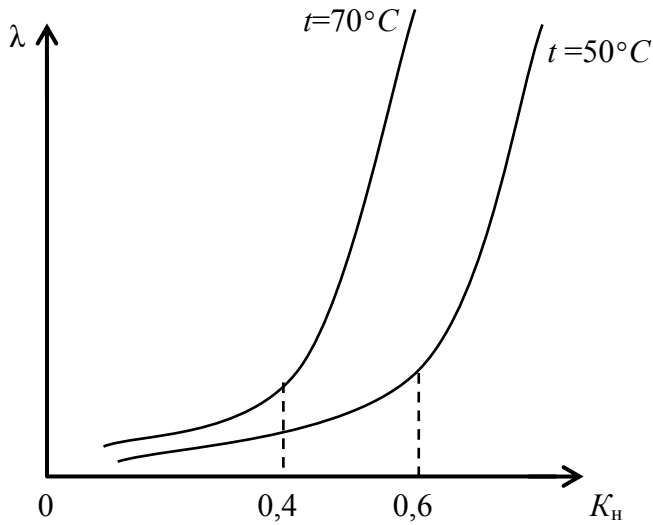


Рис. 5.1. График зависимости интенсивности отказов элементов λ от коэффициента нагрузки K_n

При проектировании аппаратуры стремятся обеспечить тепловой режим так, чтобы перегрев в РЭУ составлял не более $\Delta T \approx 20^\circ\text{C}$. С учётом максимальных рабочих температур, регламентируемых для РЭУ в стандартах (ГОСТ 15150-69), получается, что максимальная температура на корпусах элементов составляет $50...70^\circ\text{C}$.

Из графиков (см. рис. 5.1) видно: чтобы не происходило резкого возрастания интенсивности отказов, необходимо,

чтобы выполнялось условие $K_n \leq 0,4...0,6$. На этом основан принцип начального ограничения коэффициентов электрической нагрузки элементов. В промышленности существуют рекомендации по выбору значений K_n для различных видов элементов на основе этого принципа.

Максимальное предельное значение K_n указывается в документации на элементы (ТУ). Если же требуется спроектировать аппаратуру повышенного уровня надёжности, то мы должны также принять во внимание рекомендации о предельных значениях K_n с учётом нелинейности зависимости $\lambda = \varphi(K_n)$.

5.3. Выбор коэффициентов нагрузки с учётом производственного разброса параметров элементов и питающих напряжений

Для РЭУ массового и серийного производства реальные коэффициенты нагрузки одних и тех же элементов могут заметно отличаться. Отличие объясняется производственным разбросом параметров элементов и питающих напряжений. При проектировании аппаратуры для массового и серийного производства необходимо во внимание принять не только значения K_n , найденные с учётом номинальных (средних) нагрузок, но и экстремальный режим работы каждого элемента (рис.5.2). Под этим режимом для данного элемента понимают такое неблагоприятное сочетание разброса, как параметра

этого элемента, так и параметров соседних элементов и питающих напряжений, при котором коэффициент нагрузки рассматриваемого элемента принимает максимальное значение.

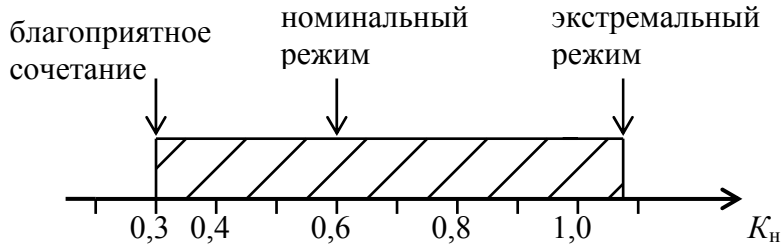


Рис. 5.2. Влияние разброса параметров элементов на коэффициент нагрузки

Замечено, что в основном для каждого элемента имеет место своё неблагоприятное сочетание разброса параметров, причём диапазон, в котором оказываются реальные значения K_n различен для разных элементов.

При проектировании аппаратуры необходимо принять во внимание значения K_n с учётом экстремальных режимов работы элементов. Эти значения могут быть найдены как расчётным методом, так и экспериментальным способом с использованием макетов устройств. Чтобы не допустить ошибку при выборе элементов по K_n от разработчика требуют так называемую «карту электрических режимов». Образец оформления такой карты имеет вид (табл. 5.1).

Таблица 5.1

Карта электрических режимов

Обозначение на электрической схеме	Тип элемента	Номинальные значения основных электрических элементов	Контролируемые параметры режима						Примечание
			1		2		3		
			Π_{1cp}	$K_{н1max}$	Π_{2cp}	$K_{н2max}$	Π_{3cp}	$K_{н3max}$	
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

P_1, P_2, P_3 — параметры электрического режима. Как правило, наличие карт электрических режимов контролируется заинтересованными организациями

5.4. Расчёт норм надёжности на составные части РЭУ

Норма надёжности — это требование к показателям надёжности конкретной части РЭУ.

Процедуру определения требований к показателям надёжности составных частей РЭУ, основываясь на заданном требовании к надёжности РЭУ в целом, называют расчётом норм надёжности.

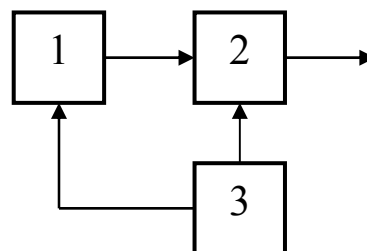
На практике при выполнении этого расчёта принимают во внимание структурную сложность составных частей РЭУ (количество элементов N) и пользуются предположением об их экспоненциальном законе надёжности.

Пример.

$$N_1=450, N_2=250, N_3=300,$$

$$P(t = 1000 \text{ ч}) = 0,9.$$

$$P_1(t) - ? \quad P_2(t) - ? \quad P_3(t) - ?$$



Решение.

1. Предполагаем, что функциональные части в РЭУ и элементы в составе функциональных частей с точки зрения надёжности соединены последовательно. Принимая во внимание предположение об экспоненциальном законе надёжности РЭУ, можно записать:

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

где λ – суммарная интенсивность отказов элементов РЭУ в целом;

$$\lambda = -\ln p(t)/t = \ln 0,9/1000 = 1,05 \cdot 10^{-4} \text{ 1/ч};$$

$$\lambda = \lambda_{\text{эл}} N_{\text{РЭУ}},$$

где $\lambda_{\text{эл}}$ – интенсивность отказов элемента, требуемая для обеспечения надёжности РЭУ в целом;

$N_{\text{РЭУ}}$ – количество элементов в РЭУ.

В данном примере $N_{\text{РЭУ}} = N_1 + N_2 + N_3$.

$$\lambda_{\text{эл}} = \lambda / N_{\text{РЭУ}} = 1,05 \cdot 10^{-4} / (450 + 250 + 300) = 1,05 \cdot 10^{-7} \text{ 1/ч}.$$

2. Очевидным является выражение

$$\lambda = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3,$$

где λ_i – относится к соответствующим блокам.

Определяем суммарные интенсивности отказов элементов блоков 1, 2 и 3. Получим

$$\lambda_1 = \lambda_{\text{эп}} N_1 = 4,74 \cdot 10^{-5} \text{ 1/ч};$$

$$\lambda_2 = 2,63 \cdot 10^{-5} \text{ 1/ч};$$

$$\lambda_3 = 3,16 \cdot 10^{-5} \text{ 1/ч}.$$

3. Находим требуемые вероятности безотказной работы блоков:

$$P_1(t) = e^{-\lambda_1 t} = 0,954;$$

$$P_2(t) = 0,974;$$

$$P_3(t) = 0,969.$$

5.5. Схмотехнические методы повышения надёжности РЭУ

Радикальным способом повышения надёжности схмотехническими методами является использование резервирования и встроенных систем автоматического диагностирования РЭУ. Однако это заметно ухудшает некоторые технико-экономические показатели (массу, габариты, стоимость), поэтому использование указанного подхода является в большинстве случаев вынужденной мерой.

В общем случае при выборе схем надо исходить из следующих соображений:

1. Схема должна иметь минимальное количество элементов. Эффект выигрыша в надёжности в этом случае объясняется с помощью основного расчётного соотношения для безотказности РЭУ:

$$P_{\text{РЭУ}}(t_3) = P_1(t_3) \cdot P_2(t_3) \cdot \dots \cdot P_N(t_3). \quad (5.1)$$

Так как $P_i(t_3) < 1$, то чем меньше сомножителей в выражении, тем больше уровень безотказности РЭУ. Введение в схему дополнительных элементов всегда должно оправдываться улучшением каких-то свойств РЭУ, например повышением помехозащищённости, улучшением температурной стабильности.

2. Выходные параметры РЭУ должны быть малокритичны к заметным изменениям параметров элементов. Это существенно повысит уровень параметрической надёжности. Нежелательно использование схем, требующих подбора параметров элементов.

3. Схема должна устойчиво работать в широком диапазоне изменений питающих напряжений. Надо стремиться использовать схемы, не требующие стабилизирования источников питания, усложняющих РЭУ в целом.

4. Надо избегать использования схем (по возможности), требующих подстроечных и регулировочных элементов.

На практике не всегда удается выбрать схему, отвечающую всем указанным требованиям. Приходится находить разумный компромисс между указанными требованиями.

5.6. Квазирезервирование

Для сложных РЭУ не всегда требуется выполнение функций в полном объеме. При проектировании таких устройств необходимо предусмотреть возможность настройки (адаптации) устройства на выполнение требуемых функций в нужном объеме. Тогда оставшаяся избыточность может использоваться для резервирования. Такой способ повышения надёжности называют **квазирезервированием**.

Поясним примером. Пусть для выполнения функций в максимальном объеме от передатчика требуется мощность P . Тогда для обеспечения этой мощности надо предусмотреть не один передатчик, а например три с мощностью $(1/3)P$ каждого. Если в конкретном случае для выполнения функций требуется мощность не более $(1/3)P$, то это обеспечивается одним передатчиком, два других же могут использоваться для резервирования и кратность резерва в этом случае составит 2:1. Однако следует знать, что резервирование возможно лишь в случаях, когда не требуется выполнения функций в полном или почти полном объеме.

5.7. Общая характеристика методов обеспечения надёжности на этапе производства

Как отмечалось, на долю ошибок производства приходится до 30-40% всех отказов РЭУ. Поэтому следует знать, что процесс производства должен быть организован таким образом, чтобы полностью реализовать уровень надёжности РЭУ, заложенный на этапе проектирования.

Мероприятия, связанные с обеспечением надёжности на этапе производства можно свести к следующим основным группам:

1. Строгое соблюдение разработанной технологии изготовления РЭУ и совершенствование технологии производства. Здесь должное внимание нужно уделить автоматизации производства, позволяющей в значительной степени снизить влияние на надёжность субъективного фактора.
2. Входной контроль комплектующих элементов и материалов.
3. Тренировка элементов и РЭУ.

4. Отбраковка потенциально ненадежных элементов методами неразрушающего контроля.
5. Отбор элементов требуемого уровня надёжности методами индивидуального прогнозирования.

Что касается технологии изготовления, то следует не забывать, что любое отклонение технологического процесса от нормы вызывает отклонение каких-то параметров или свойств РЭУ. Неточное совпадение режимов обработки материалов, пропитки, монтажно-сборочных работ и других технологических операций вначале может не вызвать заметных отклонений выходных параметров, но в последствии обязательно скажется на долговечности (уменьшение ресурса и срока службы), а также приведёт к ухудшению такой составляющей надёжности, как безотказность.

5.8. Тренировка как способ отбраковки потенциально ненадежных элементов

Тренировка – такой способ отбраковки ненадежных элементов, при которой элементы заставляют работать в таких условиях и (или) электрических режимах, при которых потенциально ненадежные элементы быстро отказывают, а хорошие элементы при этом не повреждаются и их рабочий ресурс практически не расходуется.

Виды тренировок различаются в зависимости от условий использования элементов при выполнении процедуры тренировки и наличия или отсутствия при этом электрического режима. Во многих случаях тренировку выполняют в условии наличия лишь повышенной температуры. Ее называют **термотренировкой**.

Если используется только электрический режим, то тренировка называется **электротренировкой**.

В ряде случаев используются совместно повышенные температуры и электрический режим. Тренировку в этом случае называют **электротермотренировкой**.

Возникает вопрос, всегда ли тренировка целесообразна. Для ответа на него обратимся к распределению Вейбулла, которое можно рассматривать как обобщенный закон распределения времени до отказа элементов РЭУ.

Плотность распределения времени до отказа в случае закона Вейбулла имеет вид

$$w(t) = \rho \beta t^{\beta-1} e^{-\rho t^{\beta}}, \quad (5.2)$$

где ρ, β – параметры распределения;
 β – коэффициент формы.

Известно, что интенсивность отказов как функция времени представляется выражением

$$\lambda(t) = w(t)/P(t); \quad (5.3)$$

С учётом выражения (5.2)

$$P(t) = \int_0^t w(t) dt = e^{-\rho t^\beta} \quad (5.4)$$

Следовательно,

$$\lambda(t) = \rho \beta t^{\beta-1}. \quad (5.5)$$

Построим графики для величины $\lambda(t)$ при различных значениях коэффициента формы β (рис. 5.3). Анализируя графики, можно сделать следующие выводы.

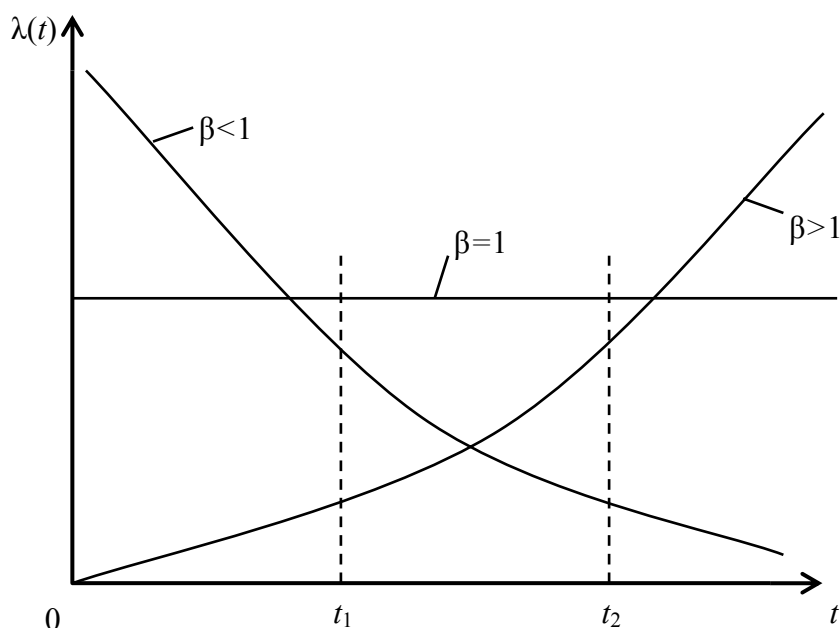


Рис. 5.3. Зависимость интенсивности отказов от времени работы

Предположим, что тренировка выполняется в течение интервала времени $(0; t_1)$, тогда из графиков видно:

1. При $\beta > 1$ средняя интенсивность отказов на интервале времени $(t_1; t_2)$, равном интервалу $(0; t_1)$ оказывается выше нежели в случае, когда тренировка не выполнялась бы. Поэтому в случае, когда $\beta > 1$ трени-

ровка не улучшает, а наоборот ухудшает надёжность элементов.

2. При $\beta = 1$ средняя интенсивность отказов на интервале $(t_1; t_2)$ совпадает с интенсивностью отказов на интервале $(0; t_1)$. Следовательно в этом случае тренировка не улучшает, но и не ухудшает надёжность элементов. С учётом того, что тренировка требует затрат, её проведение в этом случае нецелесообразно. Поэтому для таких элементов как резисторы и конденсаторы, время до отказа которых

неплохо описывается экспоненциальным распределением, проводить тренировку не имеет смысла.

3. При $\beta < 1$ средняя интенсивность отказов на интервале $(t_1; t_2)$ ниже, нежели на интервале $(0; t_1)$, т.е. тренировка в этом случае повышает надёжность элементов и, следовательно, её проводить имеет смысл. Напомним, что распределением Вейбулла при $\beta < 1$ неплохо описываются отказы большинства типов полупроводниковых приборов и ИМС. Причём для *Ge*-приборов $\beta \approx 0,4$, *Si*-приборов – $\beta \approx 0,6$. Следовательно, $\beta_{\text{ср.}} \approx 0,5$ по всей массе приборов.

Подробно с теоретическим обоснованием тренировки можно ознакомиться в §5.33 учебника [1].

Легко показать, что при нормальном законе распределения времени до отказа интенсивность отказов увеличивается. Следовательно, тренировка в этих случаях не улучшит уровень надёжности элементов, поэтому для таких элементов, как ЭЛТ, кинескопы, элементы коммутации, механические элементы тренировку проводить не следует, т.к. она не повысит уровень надёжности, а приведёт лишь к выработке рабочего ресурса элементов.

5.9. Практические приёмы тренировки полупроводниковых приборов

На практике широко используют тренировку для БТ, причём выполняют либо термотренировку, либо электро-термотренировку. Реже выполняют электротренировку.

Перед проведением тренировки выборку полупроводниковых приборов проверяют на соответствие требованиям технических условий (ТУ). Экземпляры, не отвечающие требованиям ТУ, сразу отбраковываются. После этого выполняют тренировку в течение определенного времени. После завершения тренировки все экземпляры выборки снова проверяют на соответствия требованиям ТУ. Элементы с физическим отказом (пробой, КЗ) и, не отвечающие по параметрам требованиям ТУ, отбраковывают. Оставшиеся элементы считаются надёжными и поступают для сборки устройств. При этом надо помнить, что в случае термо- и электро-термотренировки, перед измерением функциональных параметров элементы выдерживают в условиях нормальной температуры 0,5-2 часа.

Ниже приводятся типовые схемы подачи обратных напряжений на коллекторный переход в случае электро- и электро-термотренировки (рис. 5.4).

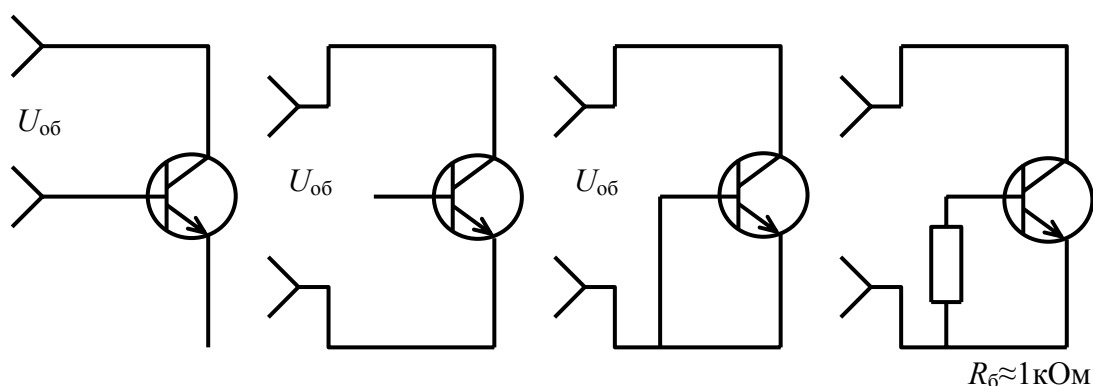


Рис. 5.4. Типовые схемы подачи обратных напряжений

Экспериментально установлено, что при выполнении электротренировки в случае подачи на коллекторный переход предельно допустимого по ТУ напряжения $U_{об}$ испытания ускоряются примерно в 10 раз.

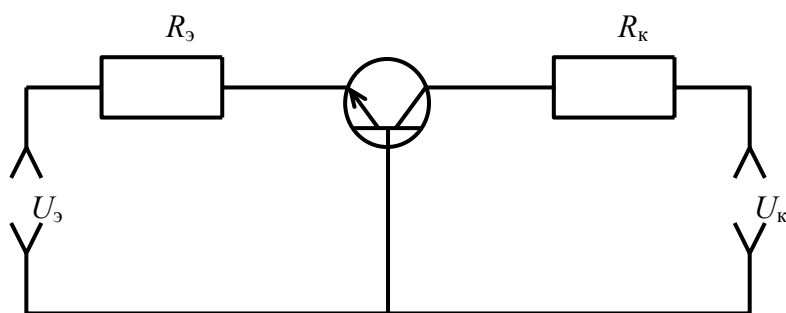


Рис. 5.5. Схема для выполнения электротренировки

При выполнении электротренировки во многих случаях используют схему (рис. 5.5). Причём сопротивления R_z и R_k выбираются такими, чтобы мощность, рассеиваемая на коллекторе транзистора, не превышала предельно допустимую по ТУ.

Во многих случаях стремятся обеспечить падение напряжения на резисторе R_k , равное половине U_k . В данном случае мощность, рассеиваемая на транзисторе, разогревает кристалл, что равносильно действию чисто тепловой нагрузки.

При реализации термотренировки возникает вопрос, в условиях какой температуры должна находиться выборка полупроводниковых приборов. Известно, что действие электрической нагрузки равносильно некоторой эквивалентной температуре, разогревающей кристалл. Разность ΔT между температурой кристалла T_k и температурой окружающей среды T_{oc} , вызывающая такое же действие, как и мощность, рассеиваемая на транзисторе, определяется выражением

$$\Delta T = R_T \cdot K_H \cdot P_{\max}, \quad (5.6)$$

где $\Delta T = T_k - T_{oc}$;

- R_T – тепловое сопротивление кристалл-окружающая среда, приводимое в документации полупроводниковый прибор, $[R_T] = ^\circ\text{C}/\text{Вт}$;
- K_H – коэффициент электрической нагрузки по мощности;
- P_{\max} – максимально допустимая рассеиваемая мощность при температуре, равной значению T_{oc} .

При термотренировке возникает следующая ситуация: перегрев ΔT необходим для создания условий, соответствующих рабочему электрическому режиму, а дальнейшее повышение температуры вызывает ускорение наработки. Естественно, возникает вопрос, до каких пределов можно повышать температуру при реализации термотренировки. Экспериментально установлено, что применительно к кремниевым полупроводниковым приборам до температуры $+160\ ^\circ\text{C}$ всегда соблюдается условие автомоделности отказов, т. е. механизм отказов такой же, как и в нормальных условиях эксплуатации, только отказы по времени происходят раньше.

При более высоких температурах с помощью типовых методик надо доказать, что автомоделность отказов не будет нарушена.

В условиях практики так же возникает вопрос о длительности тренировки. Во многих случаях она определяется, исходя из экономических затрат, необходимых на проведение тренировки, либо долей полупроводниковых приборов, которые должны остаться работоспособными после окончания тренировки.

5.10. Технологический прогон РЭУ

В сложные РЭУ, как правило, входят элементы с различными законами распределения времени до отказа, поэтому для таких РЭУ всегда существует период приработки на λ -характеристике (рис. 5.6). В условиях производства РЭУ стараются уйти из периода приработки (область A на рис. 5.6). С этой целью устройства принудительно заставляют принудительно работать в течение определенного времени. В процессе такой работы некоторые экземпляры отказывают, подвергаются ремонту и далее снова ставятся в работу.

Указанную процедуру называют тренировкой РЭУ или технологическим прогоном.

Технологический прогон позволяет увеличить надёжность устройств, поступающих потребителю. Возникает вопрос, какова должна быть длительность технологического прогона. К сожалению, длительность периода приработки для разных устройств различна и неизвестна.

Оптимальной является длительность технологического прогона, соответствующая окончанию периода приработки (точка B на рис. 5.6).

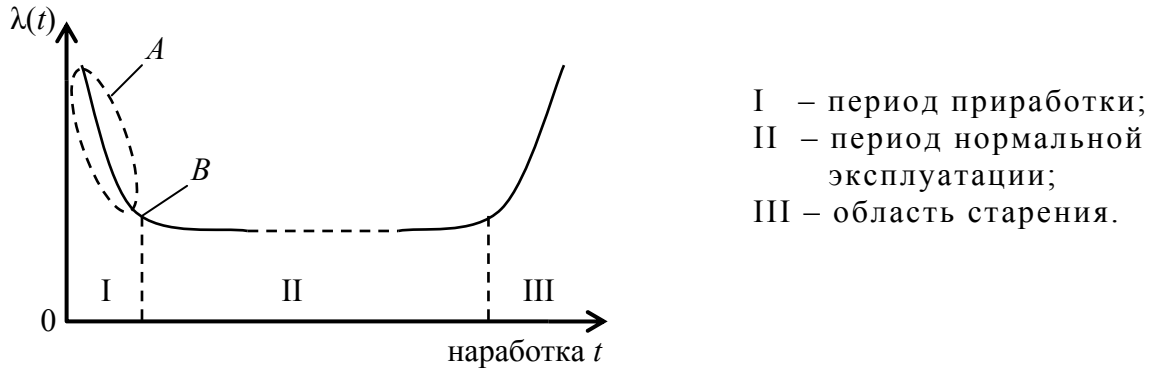


Рис. 5.6. Типичная λ -характеристика РЭУ

В реальных условиях длительность технологического прогона во многих случаях определяется экономическими факторами. Выполняя технологический прогон, иногда прибегают к ускоренным испытаниям с целью сокращения времени технологического прогона.

5.11. Отбраковка элементов методами индивидуального прогнозирования надёжности

На практике находят применение методы, основанные на использовании информативных параметров. Эти методы иначе называются методами распознавания образов (см. [1]). Под информативным понимается такой электрический параметр элемента, значение которого в момент $t = 0$ несёт информацию о надёжности конкретного экземпляра.

Для того чтобы параметр мог рассматриваться в качестве информативного необходимо, чтобы между этим параметром и уровнем надёжности элемента имела место корреляционная связь (рис. 5.7).

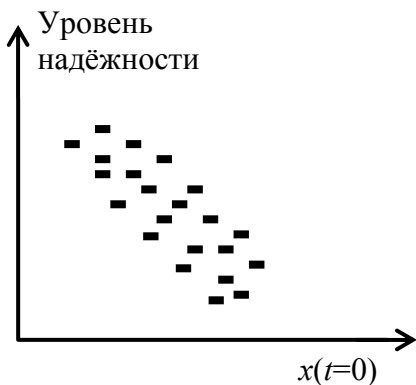


Рис. 5.7. Корреляция между уровнем надёжности и параметром x

Для выполнения индивидуального прогнозирования используется прогнозирующее правило, общий вид которого

$$j \in K_1, \text{ если } F[x_1^{(j)}, \dots, x_k^{(j)}] \geq P_0;$$

$$j \in K_2, \text{ если } F[x_1^{(j)}, \dots, x_k^{(j)}] < P_0,$$

где j — рассматриваемый экземпляр;
 K_1 — класс надёжных экземпляров на момент времени $t_{\text{пр}}$ — заданное время прогнозирования;

K_2 — класс ненадёжных экземпляров на момент времени $t_{\text{пр}}$;

F — решающая функция, подсчитанная для j -го экземпляра;

- $x_1^{(j)}, \dots, x_k^{(j)}$ – значения информативных параметров j -го экземпляра в момент времени $t=0$ (образ j -го экземпляра);
- k – число информативных параметров, используемых для прогнозирования;
- P_0 – порог разделения классов; представляет собой число, выбираемое экспериментально из условия лучшего разделения выборки элементов на классы.

Расстановка знаков $\geq, <$ в записанном прогнозирующем правиле понятна из рис. 5.8.

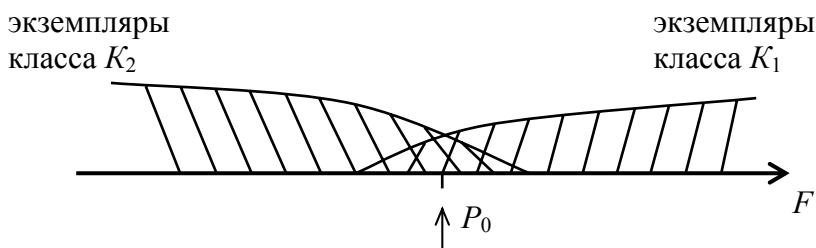


Рис. 5.8. Выбор порога разделения классов

Напомним, [1], что прогнозирующее правило получают с помощью предварительного исследования выборки интересующего типа элементов объемом n экземпляров (рис. 5.9).

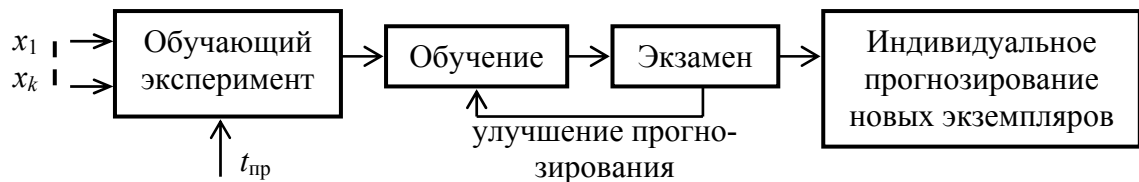


Рис. 5.9. Этапы решения задачи методом распознавания образов

5.12. Общая характеристика методов построения прогнозирующего правила

Условно эти методы делятся на две группы:

- параметрические;
- непараметрические.

В параметрических методах предполагают известными законы распределения информативных параметров для класса K_1 и для класса K_2 (рис. 5.10).

По результатам же обучающего эксперимента находят параметры этих законов распределения. В практике получил распространение случай гипотезы о нормальном законе распределения информативных параметров в классах.

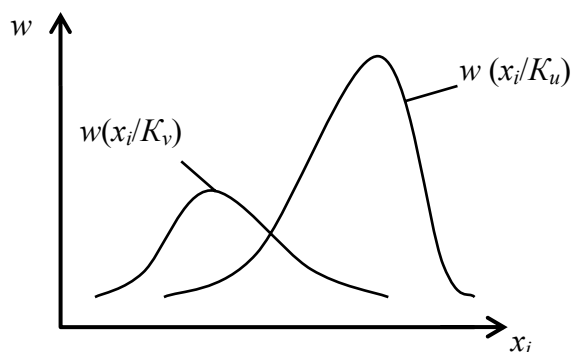


Рис. 5.10. Распределение информативного параметра

В непараметрических методах исходят из предположки, что законы распределения информативных параметров в классах априорно не известны. Методы основаны на использовании эвристических алгоритмов. По результатам обучающего эксперимента находят величины (коэффициенты), входящие в эти алгоритмы.

5.13. Метод статистических решений

Представителем параметрических методов является метод статистических решений в предположении, что распределение информативных параметров в классах K_1 и K_2 подчиняется нормальному закону.

Решающая функция в этом методе представляет собой отношение правдоподобия, определяемое для j -го экземпляра как

$$\lambda^{(j)} = \frac{w(x_1^{(j)} / K_1) \cdot \dots \cdot w(x_k^{(j)} / K_1)}{w(x_1^{(j)} / K_2) \cdot \dots \cdot w(x_k^{(j)} / K_2)}. \quad (5.7)$$

Выражение справедливо для случая, когда информативные параметры x_1, \dots, x_k являются независимыми, следовательно, некоррелированными. Этим предположением часто пользуются, решая прикладные задачи.

Для того, чтобы подсчитать $\lambda^{(j)}$ необходимо по каждому признаку (информативному параметру) иметь следующую информацию:

$$m_i^{(K1)}, \sigma_i^{(K1)}, m_i^{(K2)}, \sigma_i^{(K2)},$$

где $m_i^{(K1)}, m_i^{(K2)}$ — математическое ожидание i -го признака в классах K_1 и K_2 ;

$\sigma_i^{(K1)}, \sigma_i^{(K2)}$ — среднее квадратическое отклонение i -го признака в классах K_1 и K_2 .

Указанные характеристики определяют, используя результаты обучающего эксперимента. С помощью табл. 5.2 покажем, какие характеристики и как получать по результатам обучающего эксперимента в случае двух признаков x_1 и x_2 .

Таблица 5.2

Результаты обучающего эксперимента

Номер экземпляра обучающей выборки	x_i при $t=0$		Класс на момент $t_{пр}$
	x_1	x_2	
1	73	1,2	K_1
2	52	0,9	K_1
...
n_1	61	1,7	K_1
n_1+1	37	2,1	K_2
...
n	43	2,0	K_2

Величины $m_1^{(K1)}$ и $\sigma_1^{(K1)}$ первого признака находят, используя номера экземпляров с первого по n_1 столбца x_1 . Величины $m_1^{(K2)}$ и $\sigma_1^{(K2)}$ первого признака находят, используя номера экземпляров с n_1+1 по n столбца x_1 . Столбец x_2 используется аналогично для получения величин $m_2^{(K1)}$, $\sigma_2^{(K1)}$ и $m_2^{(K2)}$, $\sigma_2^{(K2)}$.

Подсчитанные характеристики « m » и « σ » нужны для того, чтобы записать нормальный закон распределения того или иного информативного параметра (x_i) в в классе K_1 или классе K_2 . Например, для признака x_1 в классе K_2 этот закон запишется как

$$w(x_1 / K_2) = \frac{1}{\sigma_1^{(K2)} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x_1 - m_1^{(K2)})^2}{2\sigma_1^{(K2)2}}}. \quad (5.8)$$

Графическая иллюстрация распределений для признака x_1 представлена на рис. 5.11.

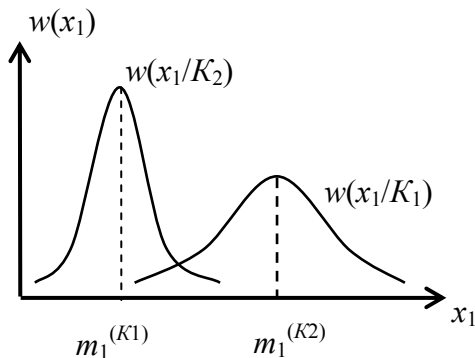


Рис. 5.11. Распределения информативного параметра в классах K_1 и K_2

Для определения значения $\lambda^{(j)}$ пользуются выражением (5.7). Если для какого-то нового экземпляра, обозначенного как l -й экземпляр, $\lambda^{(l)} > 1$, то по результатам прогнозирования этот экземпляр должен быть отнесен к классу K_1 . Если $\lambda^{(l)} < 1$, то l -й экземпляр должен быть отнесён к классу K_2 , т.е. прогнозирующее правило имеет вид

$$\lambda^{(l)} > 1, l \in K_1;$$

$$\lambda^{(l)} \leq 1, l \in K_2.$$

Замечено, что значение $\lambda^{(l)}$ изменяется в очень широком диапазоне, поэтому на практике во многих случаях пользуются не значением $\lambda^{(l)}$, а значением $\ln \lambda^{(l)} = L^{(l)}$. В этом случае прогнозирующее правило записывается в виде

$$l \in K_1, \text{ если } L^{(l)} > 0;$$

$$l \in K_2, \text{ если } L^{(l)} \leq 0.$$

Описанная процедура применения метода статистических решений был основана на двух предположениях:

1. Информативные параметры являются независимыми, следовательно, и некоррелированными (обратное – не верно).
2. Законы распределения признаков (информативных параметров) в классе K_1 и K_2 соответствуют нормальным.

Если принять во внимание корреляцию информативных параметров, то математический аппарат в методе статистических решений значительно усложняется и применение метода возможно лишь с использованием ЭВМ, т. к. приходится выполнять операции с матрицами.

В промышленности существуют руководящие документы, рекомендуемые метод для использования применительно к изделиям электронной техники. Руководящие документы также предлагают пользователям соответствующее программное обеспечение.

5.14. Метод потенциальных функций

Является одним из методов индивидуального прогнозирования надёжности по информативным параметрам изделия. В этом методе используется такое нелинейное преобразование пространства информативных параметров, которое подчеркивает (усиливает) разделение классов.

В этом методе для нового l -го экземпляра определяют суммарный потенциал $\phi_{l,\Sigma}$, наводимый на него всеми экземплярами, участвовавшими в обучающем эксперименте. Причём, считают, что экземпляры класса K_1 обучающей выборки наводят на новый экземпляр положительный, а экземпляры класса K_2 – отрицательный потенциал.

Прогнозирующее правило в этом методе записывается выражением

$$l \in K_1, \text{ если } \phi_{l,\Sigma} > 0;$$

$$l \in K_2, \text{ если } \phi_{l,\Sigma} \leq 0.$$

Графическая интерпретация метода понятна из рис. 5.12.

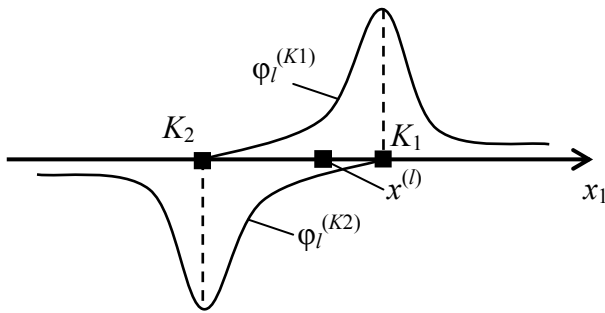


Рис. 5.12. К пояснению метода потенциальных функций:
 $\phi_l^{(K1)}$, $\phi_l^{(K2)}$ – потенциалы, наводимые на новый l -й экземпляр, соответственно экземпляром класса K_1 и класса K_2

Так как информативные параметры x_i , как правило, имеют разную размерность и изменяются в различных диапазонах, то при реализации метода пользуются нормированными значениями информативных параметров $x_{\text{норм } i}^{(j)}$, $i=1, \dots, k$; $j=1, 2, \dots, n$. Нормировку выполняют с использованием выражения

$$x_{\text{норм } i}^{(j)} = x_i^{(j)} / \sigma_i, \quad (5.9)$$

где $x_i^{(j)}$ – значение i -го информативного параметра для j -го экземпляра в размерности параметра x_i ;
 σ_i – среднеквадратическое отклонение i -го информативного параметра, посчитанное с использованием всех экземпляров обучающей выборки.

5.15. Метод дискриминантных функций

В этом методе строят линию (плоскость или поверхность), разделяющую экземпляры класса K_1 и K_2 , причём эту разделяющую линию или поверхность получают в линейном или нелинейном виде. Математическую функцию, описывающую линию (поверхность) и называют дискриминантной. Для её получения используются экземпляры классов K_1 и K_2 обучающей выборки. Во многих случаях дискриминантную функцию получают в линейном виде.

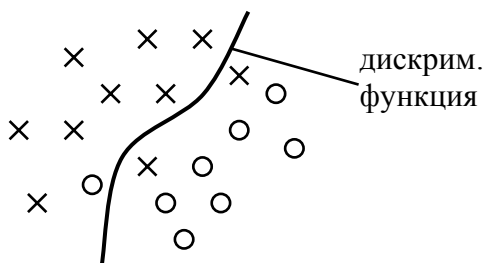


Рис. 5.13. Графическая интерпретация метода дискриминантных функций:

x – экземпляры класс K_1 ,
 o – экземпляры класс K_2

Графическая интерпретация метода иллюстрируется рис. 5.13.

Недостаток метода: сложность получения разделяющей функции при большом числе информативных параметров ($k \geq 3$), особенно в случаях нелинейности этой функции.

5.16. Метод пороговой логики

В ранее рассмотренных методах для решения задачи индивидуального прогнозирования использовались непрерывные отсчёты информативных параметров. Такие отсчёты являются избыточными для принятия решения о классе экземпляра.

В методе пороговой логики непрерывные отсчёты информативных параметров преобразуются в двоичный код (числа «0» и «1») и в дальнейшем оперируют значениями двоичных чисел. В итоге прогнозирующее правило может быть представлено простой логической таблицей, показывающей, какой комбинации двоичных чисел соответствует тот или иной класс экземпляра (примером является табл. 5.3). Количество строк таблицы не превышает числа $T=2^k$, где k – число информативных параметров, следовательно, и двоичных сигналов.

Таблица 5.3

Прогнозирующее правило в виде логической таблицы

Номер комбинации двоичных чисел	Двоичное число, соответствующее x_i				Прогнозируемый класс экземпляра
	x_1	x_2		x_k	
1	1	1		1	K_1
2	0	0		1	K_1
3	0	0	...	1	K_2
...
T	0	0		0	K_2

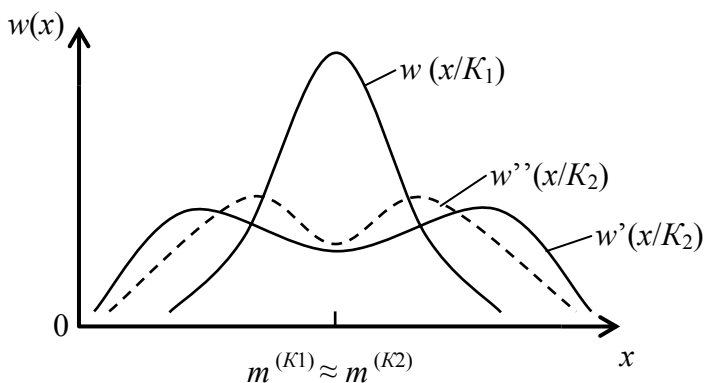


Рис. 5.14. Иллюстрация эффекта вложенности классов

Нетрудно понять, что ошибки прогнозирования определяются областью перекрытия классов по каждому информативному параметру. Недостатком метода является то, что он не может работать с информативными параметрами, для которых имеет место эффект вложенности классов (рис. 5.14). Экспериментально замечено, что в

этом случае средние значения информативного параметра в классах K_1 и K_2 примерно совпадают (см. рис.5.14).

5.17. Общая характеристика методов повышения надёжности РЭС на этапе эксплуатации

Основными методами на этом этапе являются:

1. Строгое соблюдение установленных правил эксплуатации.
2. Своевременное выполнение профилактического осмотра и планового технического обслуживания, предусмотренных технической документацией.
3. Предсказание постепенных отказов методами прогнозирования экстраполяцией параметра и заблаговременная замена устройств, у которых может возникнуть постепенный отказ.

5.18. Прогнозирование постепенных отказов методом экстраполяции (случай однопараметрических устройств)

Если функция, возлагаемая на РЭУ, в основном определяется одним выходным параметром, то проблем с прогнозированием постепенного отказа для этих РЭУ не существует, так как для них можно использовать обратное прогнозирование методом экстраполяции параметра (рис. 5.15).

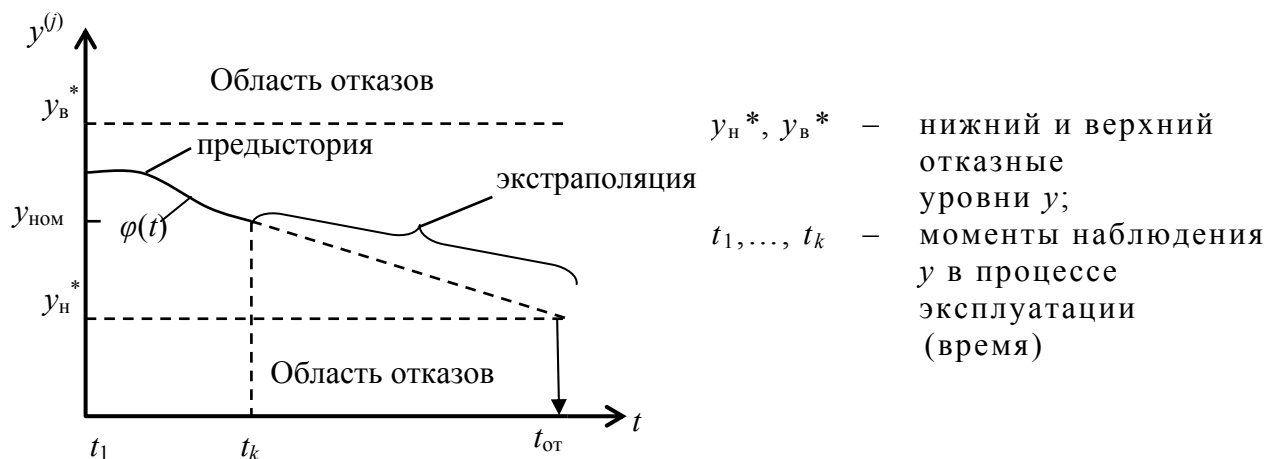


Рис. 5.15. Обратное прогнозирование методом экстраполяции параметра

При таком прогнозировании определяют время $t_{от}$, при котором функциональный параметр j -го экземпляра $y^{(j)}$ достигнет нижнего или верхнего отказного уровня. Замену экземпляра (РЭУ) нужно производить не в момент $t_{от}$, а заблаговременно в момент времени $t_{зам}$. Для этого можно найти нижнюю доверительную границу $t_{от}^{(H)}$ для времени $t_{от}$.

$$t_{зам} = t_{от}^{(H)}.$$

5.19. Прогнозирование работоспособности многопараметрических устройств

На практике во многих случаях работоспособность РЭУ определяют не одним, а несколькими функциональными (выходными) параметрами. В процессе эксплуатации РЭУ эти функциональные параметры изменяются, причём каждый по-разному. Возникает вопрос, как прогнозировать работоспособность таких устройств.

С точки зрения потери работоспособности для таких устройств можно выделить два случая:

1. Потеря работоспособности (отказ) РЭУ возникает при достижении нижнего или верхнего отказного уровня хотя бы одним из функциональных параметров (наиболее характерный случай).
2. Потеря работоспособности (отказ) происходит в случае достижения отказного уровня последним из оставшихся функциональных параметров.

Применительно к первому случаю ответ на интересующий вопрос можно получить, решив для каждого из функциональных параметров задачу обратного прогнозирования, используя метод экстраполяции параметра. Как принимается решение о времени отказа РЭУ в целом – понятно из рис. 5.16.

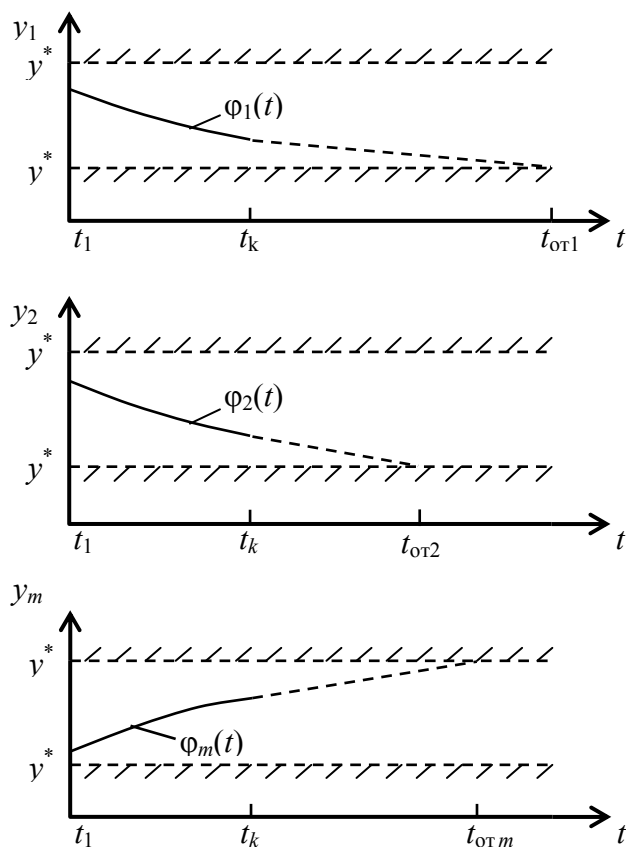


Рис. 5.16. Обратное прогнозирование методом экстраполяции m параметров

На рисунке приняты такие обозначения:

- y^* — нижний и верхний отказные уровни функциональных параметров;
- $\varphi_1(t), \dots, \varphi_m(t)$ — математические модели прогнозирования для функциональных параметров y_1, \dots, y_m ;
- t_1, \dots, t_k — моменты времени наблюдения функциональных параметров y_1, \dots, y_m при эксплуатации РЭУ;
- $t_{отj}$ — прогнозируемое время отказа РЭУ по j -му функциональному параметру.

Из рис. 5.16 видно, что в данном примере

$$t_{от \text{ РЭУ}} = \min \{t_{от1}, t_{от2}, \dots, t_{от m}\} = t_{от2}.$$

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Таблица П1.1

**Максимальные значения интенсивностей отказов
элементов РЭУ (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 ключевом режиме	0,60
Диоды высокочастотные кремниевые	0,20
Диоды высокочастотные германиевые	0,30
Диоды импульсные в ключевом режиме	0,15
Диоды выпрямительные маломощные, $I_{\text{ср.выпр}} < 300$ мА	0,20
Диоды выпрямительные средней мощности, $I_{\text{ср.выпр}} = 0 \dots 10$ А	0,50
Диоды-столбы высоковольтные выпрямительные	0,80
Блоки (мосты) выпрямительные кремниевые $I_{\text{ср.выпр}} < 400$ мА	0,40
Блоки (мосты) выпрямительные германиевые $I_{\text{ср.выпр}} > 400$ мА	1,10
Стабилитроны маломощные, $P_{\text{max}} < 1$ Вт	0,9
Стабилитроны средней мощности $P_{\text{max}} < 5$ Вт	1,25
Варикапы	0,20
Светодиоды	0,70
Диоды туннельные и обращенные	0,27
Диоды инфракрасного излучения	0,80
Фотодиоды	0,70
Диоды сверхвысокочастотные	6,00
Оптроны	0,75

Продолжение таблицы П1.1

1	2
Тиристоры маломощные, $I_{cp} < 2$ А	2,20
Тиристоры маломощные, $I_{cp} = 2...10$ 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 ползункового типа	1,10
Терморезисторы	0,20
Вариаторы	0,40
Фоторезисторы	0,50
Конденсаторы слюдяные	0,03
Конденсаторы танталовые	0,02
Конденсаторы керамические	0,05
Конденсаторы бумажные	0,07
Конденсаторы металлобумажные	0,06
Конденсаторы пластиковые	0,07
Конденсаторы нейлоновые	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 наполненные (серии ИН)	3,50
Индикаторы цифровые вакуумные накаливаемые (серии ИВ)	0,80
Индикаторы цифровые вакуумные люминесцентные серии ИВ)	2,00
Индикаторы цифробуквенные на основе светодиодов одnorазрядные	1,00
Индикаторы цифробуквенные на основе светодиодов многоразрядные	3,00
Индикаторы люминесцентные сигнальные	3,30
Лампочки сигнальные, накаливания	8,00
Лампочки сигнальные, неоновые	10,00
Кинескопы черно-белого изображения	7,50
Кинескопы цветного изображения	9,50
Трубки осциллографические (ЭЛТ)	10,00

Продолжение таблицы П1.1

	2
Катушки индуктивности, $d_{\text{пров}} < 0,1$ мм	0,30
Катушки индуктивности, $d_{\text{пров}} > 0,1$ мм	0,20
Дроссели, $d_{\text{пров}} < 0,1$ мм	0,30
Дроссели, $d_{\text{пров}} > 0,1$ мм	0,20
Обмотки сетевых трансформаторов, $d_{\text{пров}} < 0,1$ мм	0,75
Обмотки сетевых трансформаторов, $d_{\text{пров}} > 0,1$ 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**
Реле электромагнитные миниатюрные	0,60**
Герконы	0,30*
Соединители (разъемы) штепсельные	0,20***
Гнезда, клеммы	0,70*
Вилки двухполюсные	0,50
Зажимы	0,01*
Тумблеры, кнопки	0,40**
Переключатели галетные	0,40**
Переключатели малогабаритные	0,30**
Переключатели малогабаритные модульные (П2К) с независимой фиксацией	0,30**
Переключатели малогабаритные модульные (П2К) с зависимой фиксацией	0,37**
Микропереключатели типа МП	0,30*
Штекеры (гнезда) телевизионные	2,12
Лепесток контактный	0,20
Плата (колодка) контактная межблочного монтажа	0,40*
Провод монтажный	0,30****
Кабели (шнуры)	0,60****
Кабели (шнуры) питания	2,00****
Держатели предохранителей	0,20
Предохранители	5,00
Изоляторы	0,50
Шайбы, прокладки изолирующие	0,75
Соединения пайкой, ток постоянный	0,04
Соединения пайкой, ток пульсирующий	0,40
Соединения накруткой	0,02
Платы печатного монтажа	0,20
Линии задержки	0,75
Фильтры пьезокерамические	0,25
Резонаторы кварцевые	0,37
Магнитопроводы ленточные	0,10
Ферритовые элементы	0,01
Головки магнитные малогабаритные	7,50

Продолжение таблицы П1.1

1	2
Электродвигатели асинхронные, сельсины	12,30
Электродвигатели синхронные	0,51
Электродвигатели постоянного тока	13,40
Батареи однозарядные	43,00
Батареи заряжаемые	2,00
Аккумуляторы	10,30
Датчики электромеханические пассивные	15,00
Конструкции несущие легкоъемных субблоков	0,10
Конструкции несущие РЭА	3,00
Пружины	2,20
Соединения механической пайкой	0,06
Соединения винтами 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;
- **** — на каждый метр длины при номинальной плотности тока в проводе (неполный метр длины должен считаться как один метр).

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Значения поправочных коэффициентов (составлено для учебных целей)

Таблица П2.1

Значения поправочных коэффициентов α_3 , учитывающих влияние механических воздействий [14]

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 П2.2

Значения поправочных коэффициентов α_4 , учитывающих влияние относительной влажности [14]

Относительная влажность	Значение α_4
60...70% при $t = 20...40\text{ }^{\circ}\text{C}$	1,00
90...98% при $t = 20...25\text{ }^{\circ}\text{C}$	2,0
90...98% при $t = 30...40\text{ }^{\circ}\text{C}$	2,5

Таблица П2.3

Значения поправочных коэффициентов α_5 , учитывающих атмосферное давление (высоту над уровнем моря) [14]

Высота, км	Значение α_5	Высота, км	Значение α_5
0...1	1,00	5...6	1,16
1...2	1,05	6...8	1,20
2...3	1,10	8...10	1,25
3...5	1,14	10...15	1,30

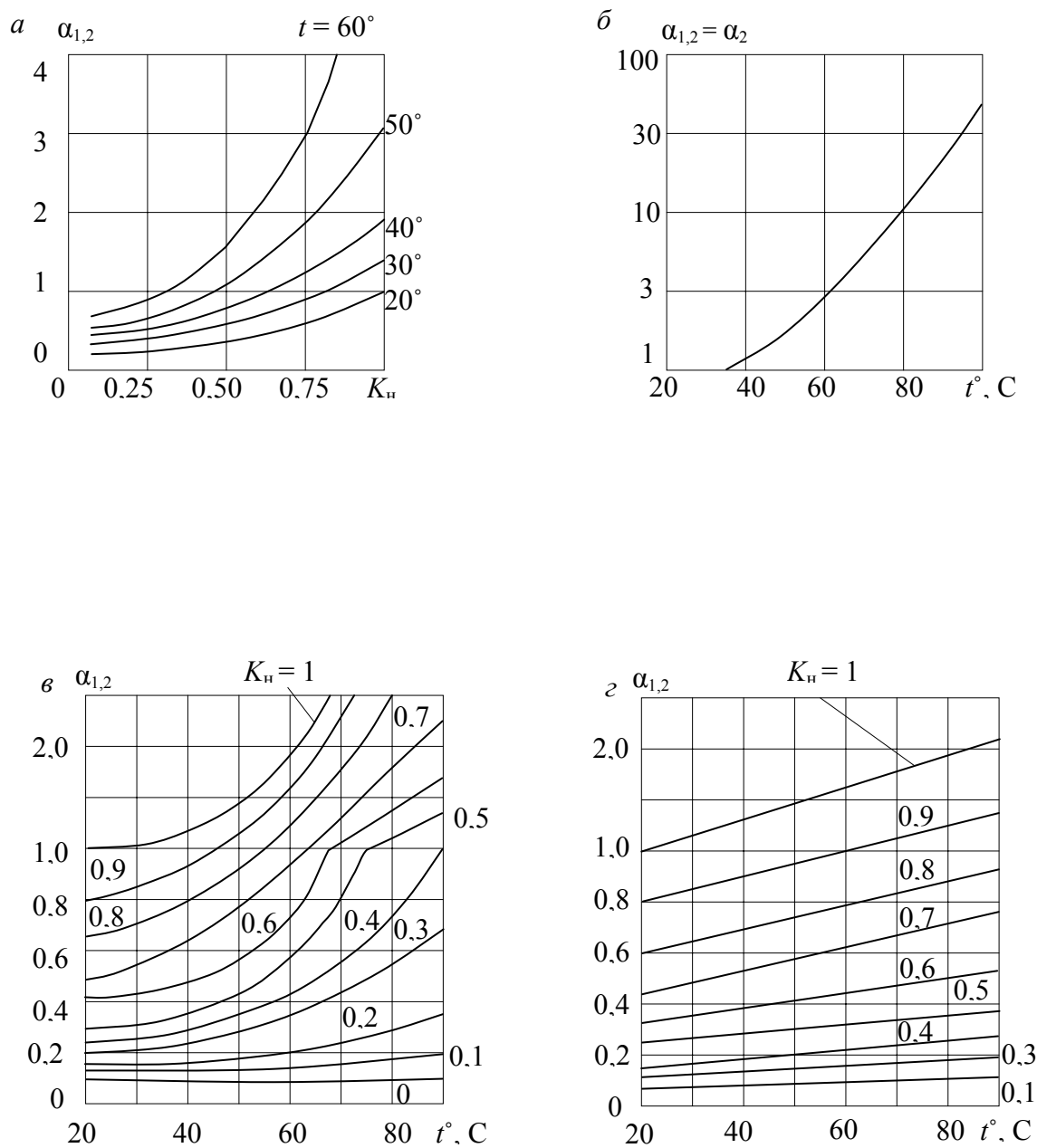


Рис.П2.1. Обобщенные зависимости поправочного коэффициента $\alpha_{1,2}$ от температуры и коэффициента нагрузки:
а) для контактных элементов (разъемов, реле, переключателей и т.п.);
б) для соединений пайкой;
в) для резисторов типов МЛТ и ОМЛТ;
г) для переменных проволочных резисторов

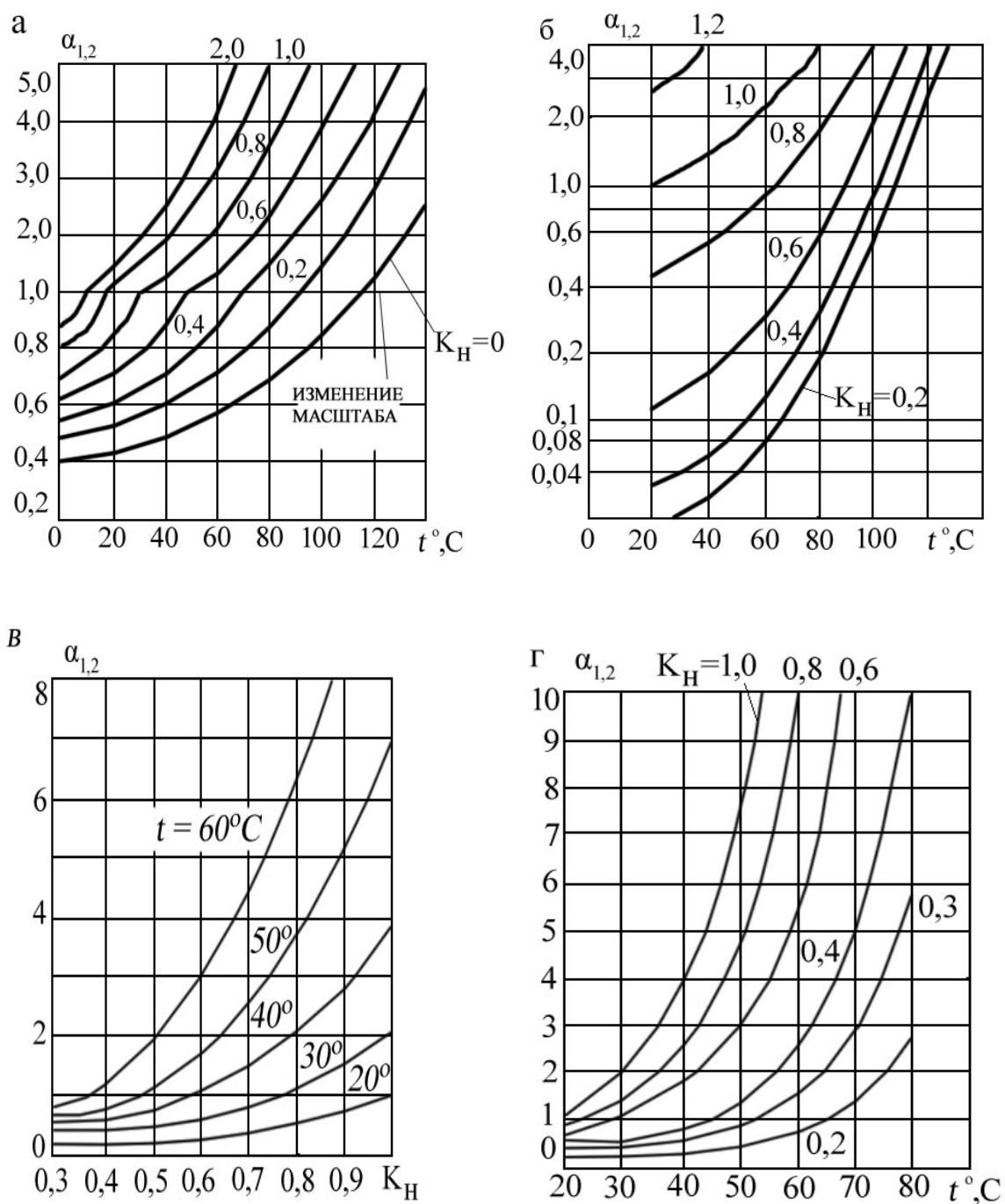


Рис.П2.2. Обобщённые зависимости поправочного коэффициента $\alpha_{1,2}$ от температуры и коэффициента нагрузки:

а - для резисторов;

б - для неполярных конденсаторов;

в - для изделий, имеющих обмотки;

г - для электролитических конденсаторов

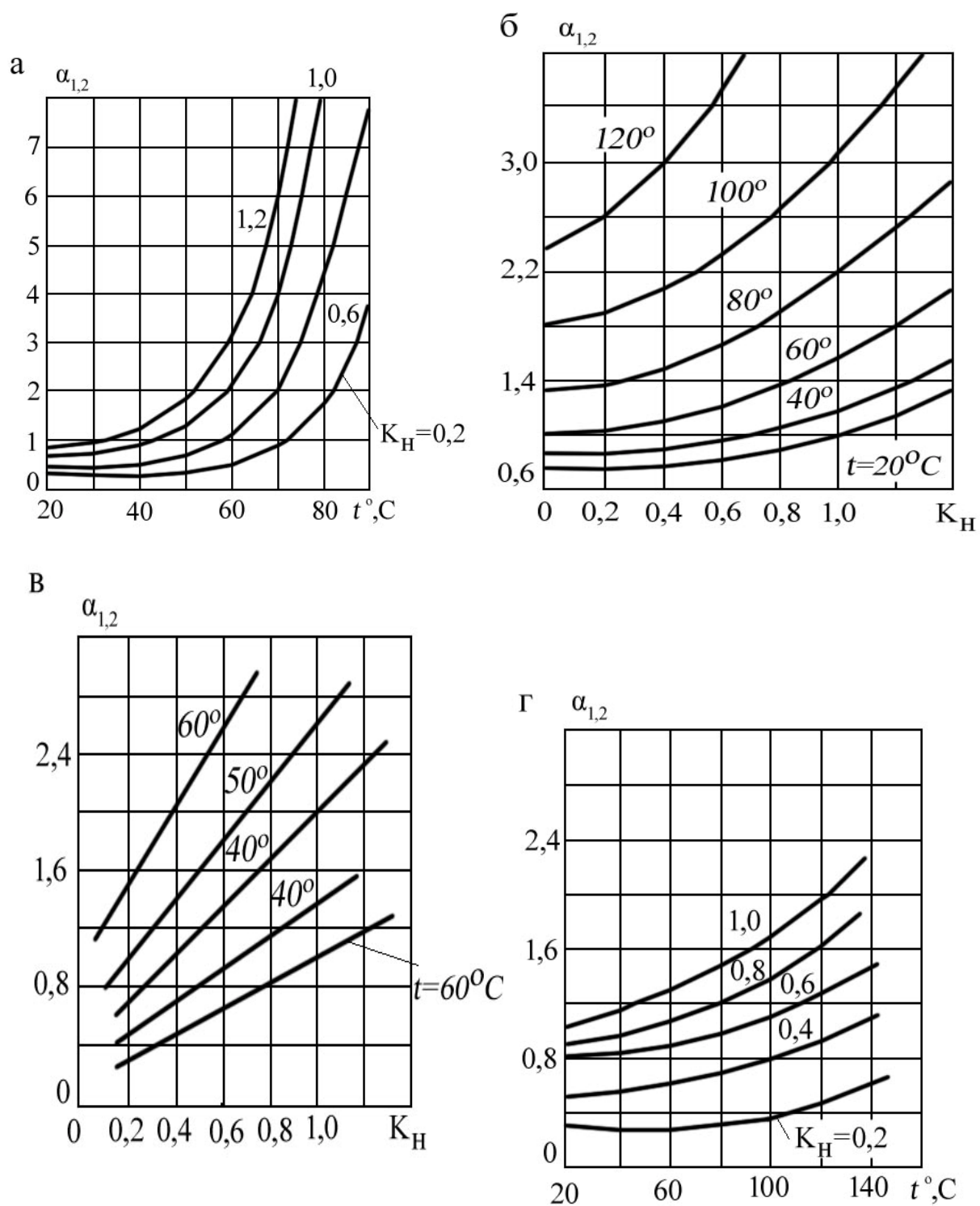


Рис.П2.3. Обобщённые зависимости поправочного коэффициента $\alpha_{1,2}$ от температуры и коэффициента нагрузки для полупроводниковых приборов:

- а) германиевых диодов;**
- б) кремниевых диодов;**
- в) германиевых транзисторов;**
- г) кремниевых транзисторов**

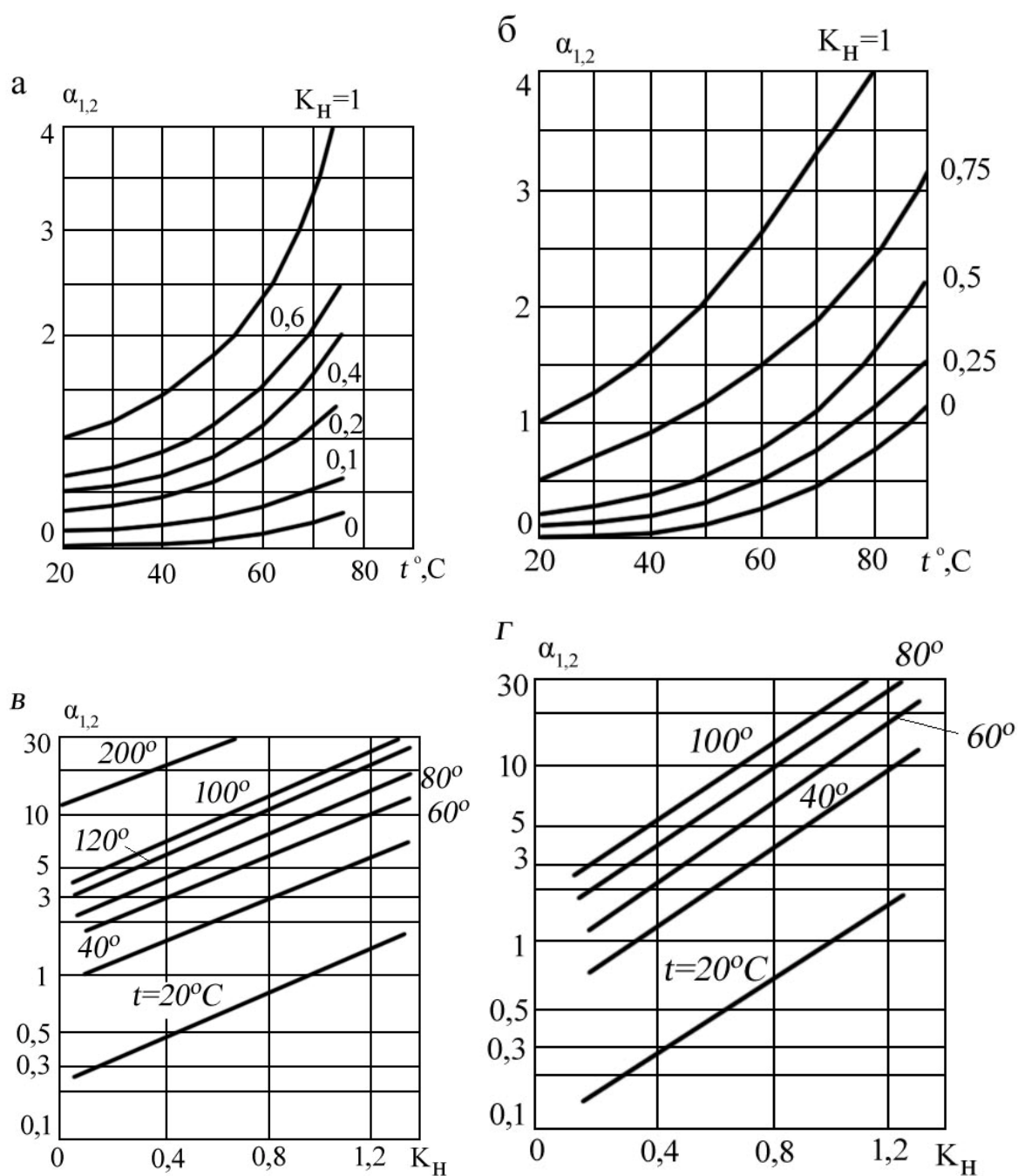


Рис.П2.4. Обобщённые зависимости поправочного коэффициента $\alpha_{1,2}$ от температуры и коэффициента нагрузки:

- а) для кремниевых высокочастотных транзисторов;**
- б) для германиевых высокочастотных транзисторов;**
- в) для полупроводниковых цифровых интегральных микросхем;**
- г) для полупроводниковых линейно-импульсных интегральных микросхем**

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

**Средние значения случайного времени
восстановления τ_i элементов и функциональных
частей РЭУ (для учебных целей)**

Элемент, функциональная часть РЭУ	τ_i , 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

ПРИЛОЖЕНИЕ 4

Таблица П4.1

Значение нормальной функции распределения

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-t^2/2} dt$$

x	$\Phi(x)$	x	$\Phi(x)$	x	$\Phi(x)$
1	2	3	4	5	6
-4,00	0,0000	-1,91	0,0281	-1,62	0,0526
-3,90	0,0001	-1,90	0,0288	-1,61	0,0537
-3,80	0,0001	-1,89	0,0294	-1,60	0,0548
-3,70	0,0002	-1,88	0,0301	-1,59	0,0559
-3,60	0,0002	-1,87	0,0307	-1,58	0,0571
-3,50	0,0003	-1,86	0,0314	-1,57	0,0582
-3,50	0,0003	-1,85	0,0322	-1,56	0,0594
-3,30	0,0005	-1,84	0,0329	-1,55	0,0606
-3,20	0,0007	-1,83	0,0336	-1,54	0,0618
-3,10	0,0010	-1,82	0,0344	-1,53	0,0630
-3,00	0,0014	-1,81	0,0351	-1,52	0,0643
-2,90	0,0019	-1,80	0,0359	-1,51	0,0655
-2,80	0,0026	-1,79	0,0367	-1,50	0,0668
-2,70	0,0035	-1,78	0,0375	-1,49	0,0681
-2,60	0,0047	-1,77	0,0384	-1,48	0,0694
-2,50	0,0063	-1,76	0,0392	-1,47	0,0708
-2,40	0,0082	-1,75	0,0401	-1,46	0,0721
-2,30	0,0108	-1,74	0,0409	-1,45	0,0735
-2,20	0,0139	-1,73	0,0417	-1,44	0,0749
-2,10	0,0179	-1,72	0,0427	-1,43	0,0764
-2,00	0,0228	-1,71	0,0436	-1,42	0,0778
-1,99	0,0233	-1,70	0,0446	-1,41	0,0793
-1,98	0,0239	-1,69	0,0455	-1,40	0,0808
-1,97	0,0244	-1,68	0,0465	-1,39	0,0823
-1,96	0,0250	-1,67	0,0475	-1,38	0,0838
-1,95	0,0256	-1,66	0,0485	-1,37	0,0853
-1,94	0,0262	-1,65	0,0495	-1,36	0,0869
-1,93	0,0268	-1,64	0,0505	-1,35	0,09115
-1,92	0,0274	-1,63	0,0516	-1,34	0,0901
-1,33	0,0918	-0,89	0,1867	-0,45	0,3264
-1,32	0,0934	-0,88	0,1894	-0,44	0,3300
-1,31	0,0951	-0,87	0,1922	-0,43	0,3336
-1,30	0,0968	-0,86	0,1949	-0,42	0,3372
-1,29	0,0985	-0,85	0,1977	-0,41	0,3409
-1,28	0,1003	-0,84	0,2005	-0,40	0,3446
-1,27	0,1020	-0,83	0,2033	-0,39	0,3483
-1,26	0,1038	-0,82	0,2061	-0,38	0,3520

Продолжение таблицы П4.1

1	2	3	4	5	6
-1,25	0,1056	-0,81	0,2090	-0,37	0,3557
-1,24	0,1075	-0,80	0,2119	-0,36	0,3594
-1,23	0,1093	-0,79	0,2148	-0,35	0,3632
-1,22	0,1112	-0,78	0,2177	-0,34	0,3669
-1,21	0,1131	-0,77	0,2206	-0,33	0,3707
-1,20	0,1151	-0,76	0,2236	-0,32	0,3745
-1,19	0,1170	-0,75	0,2266	-0,31	0,3783
-1,18	0,1190	-0,74	0,2296	-0,30	0,3821
-1,17	0,1210	-0,73	0,2327	-0,29	0,3859
-1,16	0,1230	-0,72	0,2358	-0,28	0,3897
-1,15	0,1251	-0,71	0,2389	-0,27	0,3936
-1,14	0,1271	-0,70	0,2420	-0,26	0,3974
-1,13	0,1292	-0,69	0,2451	-0,25	0,4013
-1,12	0,1314	-0,68	0,2483	-0,24	0,4052
-1,11	0,1335	-0,67	0,2514	-0,23	0,4090
-1,10	0,1357	-0,66	0,2546	-0,22	0,4129
-1,09	0,1379	-0,65	0,2578	-0,21	0,4168
-1,08	0,1401	-0,64	0,2671	-0,20	0,4207
-1,07	0,1423	-0,63	0,2643	-0,19	0,4247
-1,06	0,1446	-0,62	0,2676	-0,18	0,4286
-1,05	0,1469	-0,61	0,2709	-0,17	0,4325
-1,04	0,1492	-0,60	0,2743	-0,16	0,4364
-1,03	0,1515	-0,59	0,2776	-0,15	0,4404
-1,02	0,1539	-0,58	0,2810	-0,14	0,4443
-1,01	0,1562	-0,57	0,2843	-0,13	0,4483
-1,00	0,1587	-0,56	0,2877	-0,12	0,4522
-0,99	0,1611	-0,55	0,2912	-0,11	0,4562
-0,98	0,1635	-0,54	0,2946	-0,10	0,4602
-0,97	0,1660	-0,53	0,2981	-0,09	0,4641
-0,96	0,1685	-0,52	0,3015	-0,08	0,4681
-0,95	0,1711	-0,51	0,3050	-0,07	0,4721
-0,94	0,1736	-0,50	0,3085	-0,06	0,4761
-0,93	0,1762	-0,49	0,3121	-0,05	0,4801
-0,92	0,1788	-0,48	0,3156	-0,04	0,4840
-0,91	0,1814	-0,47	0,3192	-0,03	0,4880
-0,90	0,1841	-0,46	0,3228	-0,02	0,4920
-0,01	0,4960	0,43	0,6664	0,87	0,8078
0,00	0,5000	0,44	0,6700	0,88	0,8106
0,01	0,5040	0,45	0,6736	0,89	0,8133
0,02	0,5080	0,46	0,6772	0,90	0,8159
0,03	0,5120	0,47	0,6808	0,91	0,8186
0,04	0,5160	0,48	0,6844	0,92	0,8212
0,05	0,5199	0,49	0,6879	0,93	0,8232
0,06	0,5239	0,50	0,6915	0,94	0,8264
0,07	0,5279	0,51	0,6950	0,95	0,8289
0,08	0,5319	0,52	0,6925	0,96	0,8315
0,09	0,5359	0,53	0,7019	0,97	0,8340

Продолжение таблицы П4.1

1	2	3	4	5	6
0,10	0,5398	0,54	0,7054	0,98	0,8365
0,11	0,5438	0,55	0,7088	0,99	0,8389
0,12	0,5478	0,56	0,7123	1,00	0,8413
0,13	0,5517	0,57	0,7157	1,01	0,8438
0,14	0,5557	0,58	0,7190	1,02	0,8461
0,15	0,5596	0,59	0,7224	1,03	0,8485
0,16	0,5636	0,60	0,7257	1,04	0,8508
0,17	0,5675	0,61	0,7291	1,05	0,8531
0,18	0,5714	0,62	0,7324	1,06	0,8554
0,19	0,5753	0,63	0,7357	1,07	0,8577
0,20	0,5793	0,64	0,7389	1,08	0,8599
0,21	0,5832	0,65	0,7422	1,09	0,8621
0,22	0,5871	0,66	0,7454	1,10	0,8643
0,23	0,5910	0,67	0,7486	1,11	0,8665
0,24	0,5948	0,68	0,7517	1,12	0,8686
0,25	0,5987	0,69	0,7549	1,13	0,8708
0,26	0,6026	0,70	0,7580	1,14	0,8729
0,27	0,6064	0,71	0,7611	1,15	0,8749
0,28	0,6103	0,72	0,7642	1,16	0,8770
0,29	0,6141	0,73	0,7673	1,17	0,8790
0,30	0,6179	0,74	0,7704	1,18	0,8810
0,31	0,6217	0,75	0,7734	1,19	0,8830
0,32	0,6255	0,76	0,7764	1,20	0,8849
0,33	0,6293	0,77	0,7794	1,21	0,8869
0,34	0,6331	0,78	0,7823	1,22	0,8888
0,35	0,6368	0,79	0,7852	1,23	0,8907
0,36	0,6406	0,80	0,7881	1,24	0,8925
0,37	0,6443	0,81	0,7910	1,25	0,8944
0,38	0,6480	0,82	0,7939	1,26	0,8962
0,39	0,6517	0,83	0,7967	1,27	0,8990
0,40	0,6554	0,84	0,7995	1,28	0,8997
0,41	0,6591	0,85	0,8023	1,29	0,9015
0,42	0,6628	0,86	0,8051	1,30	0,9032
1,31	0,9049	1,61	0,9463	1,91	0,9719
1,32	0,9066	1,62	0,9474	1,92	0,9726
1,33	0,9082	1,63	0,9484	1,93	0,9732
1,34	0,9099	1,64	0,9495	1,94	0,9738
1,35	0,9115	1,65	0,9505	1,95	0,9744
1,36	0,9131	1,66	0,9515	1,96	0,9750
1,37	0,9147	1,67	0,9525	1,97	0,9756
1,38	0,9162	1,68	0,9535	1,98	0,9761
1,39	0,9177	1,69	0,9545	1,99	0,9767
1,40	0,9192	1,70	0,9554	2,00	0,9772
1,41	0,9207	1,71	0,9564	2,10	0,9821
1,42	0,9222	1,72	0,9573	2,20	0,9861
1,43	0,9236	1,73	0,9583	2,30	0,9892
1,44	0,9251	1,74	0,9591	2,40	0,9918

Продолжение таблицы П4.1

1	2	3	4	5	6
1,45	0,9265	1,75	0,9599	2,50	0,9937
1,46	0,9279	1,76	0,9608	2,60	0,9953
1,47	0,9292	1,77	0,9616	2,70	0,9965
1,48	0,9306	1,78	0,9525	2,80	0,9974
1,49	0,9319	1,79	0,9633	2,90	0,9981
1,50	0,9332	1,80	0,9641	3,00	0,9986
1,51	0,9345	1,81	0,9649	3,10	0,9990
1,52	0,9357	1,82	0,9656	3,20	0,9993
1,53	0,9370	1,83	0,9664	3,30	0,9995
1,54	0,9382	1,84	0,9671	3,40	0,9996
1,55	0,9394	1,85	0,9678	3,50	0,9997
1,56	0,9406	1,86	0,9686	3,60	0,9998
1,57	0,9418	1,87	0,9693	3,70	0,9998
1,58	0,9429	1,88	0,9699	3,80	0,9999
1,59	0,9441	1,89	0,9706	3,90	0,9999
1,60	0,9452	1,90	0,9713	4,00	1,0000

Значения $\Phi(x)$ подсчитаны по формуле [1]

$$\Phi(x) = 1 - f(x) \sum_{i=1}^5 a_i w^i; \quad x \geq 0,$$

где $w = \frac{1}{1+px}; \quad f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-x^2/2};$

$$\begin{aligned} p &= 0,2316419; & a_2 &= -0,3565638; & a_4 &= -1,821256; \\ a_1 &= 0,3193815; & a_3 &= 1,781478; & a_5 &= 1,330274. \end{aligned}$$

Если $x < 0$, то $\Phi(-x) = 1 - \Phi(x)$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Боровиков С.М. Теоретические основы конструирования, технологии и надёжности: Учеб. для инж.-техн. спец. вузов.- Мн.: Дизайн ПРО, 1998.— 336 с.
2. Надёжность в технике. Основные понятия термины и определения. ГОСТ 27.002-89 — Издательство стандартов, 1990.
3. Надёжность технических систем. Справочник /Ю.К. Беляев, В.А. Богатырев, В.В. Болотин и др./ Под ред. И.А. Ушакова — М.: Радио и связь, 1985. — 608 с.
4. European Organization of the Quality Control Glassary. — Bern: EOQC. 1988. — 24 p.
5. Надёжность и эффективность в технике. Справочник в 10 т. /Ред. совет: В.С. Авдеевский (пред.) и др. Т. 2. Математические методы в теории надёжности и эффективности /Под ред. Б.В. Гнеденко. — М.: Машиностроение, 1987. — 280 с.
6. Широков А.М. Надёжность радиоэлектронных устройств. Учеб. пособие для вузов. — М.: Высш. школа, 1972. — 272 с.
7. Шишенок Н.А., Репкин В.Ф., Барвинский Л.Л. Основы теории надёжности и эксплуатации радиоэлектронной техники /Под ред. Н.А. Шишонка. — М.: Сов. радио, 1964. — 552 с.
8. Harris A.P., Parsons M.F. Duchesne C.J.M. Establishing and confirming R and M. requirements for DND vehicles. "Microelectronics and Reliability, 1980, 20, №1/2, 55-73 — Экспресс-информация. Надёжность и контроль качества — М.: — ВИНТИ, 1981, №37.
9. Боровиков СМ. Надёжность радиоэлектронных устройств: Учеб. пособие для студентов радиоэлектронных специальностей. — Мн.: БГУИР, 1997. — 80 с.
10. Улинич Р.Б. Практическое обеспечение надёжности РЭА при проектировании. — М.: Радио и связь, 1985. — 112 с. (Б-ка инженера по надёжности).
11. Чернышев А.А. Основы надёжности полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. — М.: Радио и связь 1988. — 256 с.
12. Фомин А.В., Борисов В.Ф., Чермошенский В.В. Допуски в радиоэлектронной аппаратуре. — М.: Сов. радио, 1973. — 129 с.
13. Гаскаров Д.В., Голинкевич Т.А., Мозгалеvский А.В. Прогнозирование технического состояния и надёжности радиоэлектронной аппаратуры. — М.: Сов. радио, 1974. — 222 с.
14. Яншин А.А. Теоретические основы конструирования, технологии и надёжности ЭВА: Учеб. пособие для вузов. — М.: Радио и связь, 1983. — 312 с.