

Глава 5. ОСНОВЫ ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ. МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ РЭУ

5.1. Причины обострения проблема надежности РЭУ

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

1. РЭУ заметно усложнились в схемотехническом отношении.
2. Ужесточились условия, в которых эксплуатируются 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.).

5.2. Основные понятия и определения теории надежности

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

Основными понятиями теории надежности являются понятия «надежность» и «отказ».

Под надежностью 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.

Надежность 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 надежностью в узком смысле слова понимают безотказность изделия.

Многие понятия и определения теории надежности базируются на таких понятиях, как работоспособность и безотказность [18–20].

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.

Ремонтопригодность – 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 надежности различают надежность устройств и надежность входящих в него элементов. Устройства чаще являются изделиями восстанавливаемыми. Элементы – обычно изделия невосстанавливаемые.

РЭУ, как системы, с точки зрения надежности 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.

5.3. 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 надежности РЭУ, представлена в табл.5.1.

Таблица 5.1

Классификация отказов РЭУ и их элементов

Классификационный признак	Вид отказа
Характер возникновения отказа	Внезапный Постепенный
Время существования отказа	Постоянный Временный Перебегающий (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 [21] 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.

5.4. Схема соединения элементов в устройстве с точки зрения надежности

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

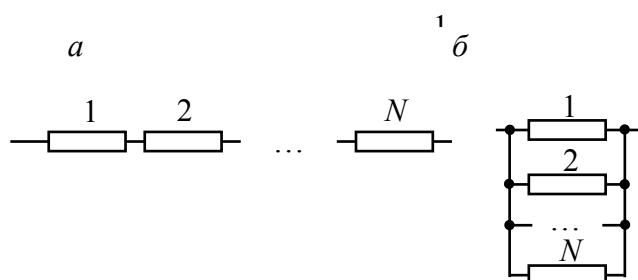


Рис.5.1. Схемы (модели) соединения элементов в устройстве с точки зрения надежности:

а – последовательное соединение;

б – параллельное соединение;

N – количество элементов в устройстве

1. Последовательное соединение элементов (рис.5.1, а). В этом случае отказ РЭУ возникает в случае отказа хотя бы одного из элементов.

2. Параллельное соединение элементов (рис.5.1, 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.

5.5. Причины отказов РЭУ

Замечено, что на долю ошибок проектирования РЭУ приходится до 40...50% всех отказов (табл.5.2).

Отказы из-за ошибок (дефектов) производства возникают в 30...40% случаев (табл.5.3).

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

Таблица 5.2

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 5.3

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

5.6. 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 надежности пригодны приемы теории вероятностей [22].

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.5.2)

$$w(t) = \lambda e^{-\lambda t}; \quad \lambda > 0, \quad t \geq 0, \quad (5.1)$$

где λ – параметр модели (распределения).

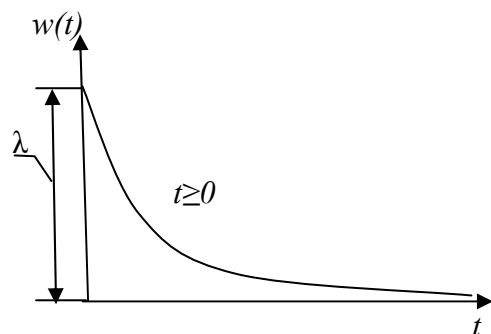


Рис.5.2 Экспоненциальное распределение времени до отказа

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

Для модели Вейбулла плотность распределения времени до отказа

описывается выражением

$$w(t) = \rho \beta t^{\beta-1} e^{-\rho t^\beta}, \quad (5.2)$$

где ρ , β – параметры модели (распределения).

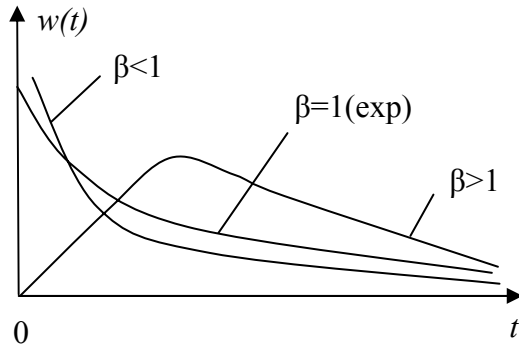


Рис.5.3. Распределение времени до отказа по закону Вейбулла

Параметр β называют коэффициентом формы. От значения этого коэффициента во многом зависит график функции $w(t)$ (рис.5.3).

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

распределению.

Для нормальной модели плотность распределения времени до отказа описывается выражением

$$w(t) = \frac{1}{\sigma_t \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-t_{cp})^2}{2\sigma_t^2}}, \quad (5.3)$$

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.5.4.

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

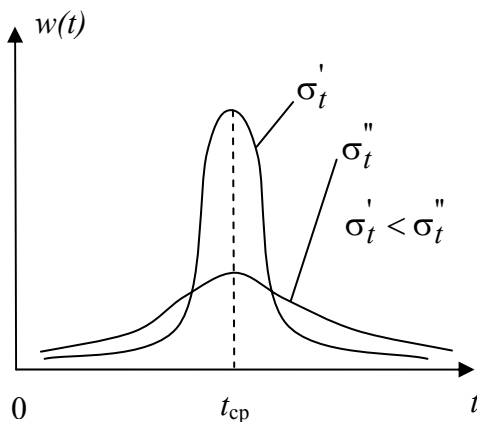


Рис.5.4. Распределение времени до отказа по нормальному закону

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

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 надежность и фиксируя время до отказа каждого изделия, получим ряд

значений случайной величины – времени до отказа. Общепринятыми приемами математической статистики для времени до отказа можно построить гистограмму распределения (рис.5.5) и попытаться восстановить вид функции $w(t)$.

Величины w_i^* определяют по формуле

$$w_i^* = \frac{n(\Delta t_i)}{N \cdot \Delta t_i}, \quad (5.4)$$

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.

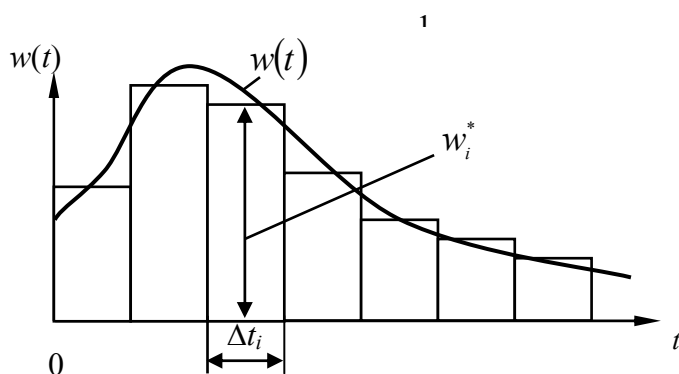


Рис.5.5. Гистограмма распределения времени до отказа

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 надежности изделий, однако, без знания этой характеристики трудно определить интересующие нас показатели безотказности.

5.7. Показатели надежности РЭУ и их элементов

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

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

Для количественного описания различных сторон надежности 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 ремонтопригодности, 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 надежности. Показатели этой группы выступают в виде эксплуатационных коэффициентов надежности, 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 надежности.

5.8. 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

$$P(t_3) = \text{Вер}\{T \geq t_3\}, \quad (5.5)$$

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

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

Причем 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:

$$q(t) = 1 - P(t). \quad (5.6)$$

С другой стороны, вероятность отказа можно представить как

$$q(t) = \text{Вер}\{T < t\}. \quad (5.7)$$

Рассматривая выражение (5.7) с учетом определений, вводимых в теории вероятностей, можно прийти к выводу, что

$$q(t) = F(t), \quad (5.8)$$

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

Графики, функций $P(t)$ и $q(t)$ приведены на рис.5.6.

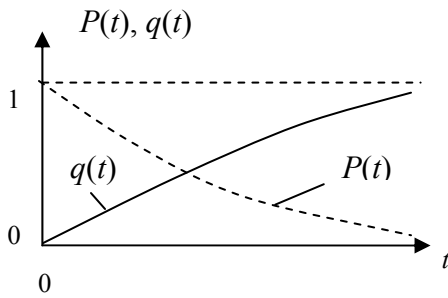


Рис.5.6. Графики функций $P(t)$ и $q(t)$

Зависимость вероятности безотказной работы от времени называют функцией надежности. 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

$$P(t_3) = \int_{t_3}^{\infty} w(t) dt, \quad (5.9)$$

а вероятность отказа за время t_3

$$q(t_3) = \int_0^{t_3} w(t) dt. \quad (5.10)$$

Геометрическая интерпретация выражений (5.9) и (5.10) показана на рис 5.7.

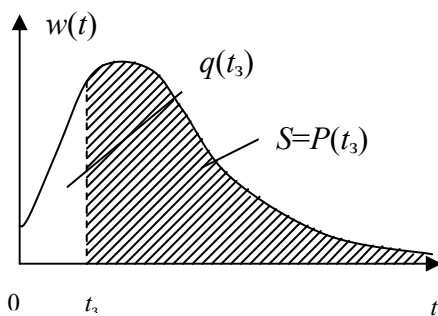


Рис.5.7. К определению вероятности безотказной работы и вероятности отказа

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

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

с использованием выражения (5.9) можно получить

$$P(t) = e^{-\lambda t}. \quad (5.11)$$

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

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

$$P(t_3) = \frac{N - n(t_3)}{N}; \quad q(t_3) = \frac{n(t_3)}{N}, \quad (5.12)$$

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 [8, 20, 22].

5.9. Интенсивность отказов

Под *интенсивностью отказов элементов* понимают величину, численно равную

$$\lambda_i^* = \frac{n(\Delta t_i)}{N_{\text{ср}i} \cdot \Delta t_i}, \quad (5.13)$$

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.

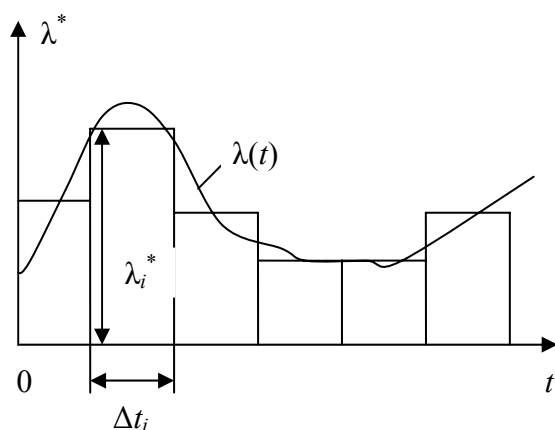


Рис.5.8. Восстановление вида функции $\lambda(t)$

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

Рассчитанное по формуле (5.13) 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.5.8).

Интенсивность отказов устройства можно определить, пользуясь выражением

$$\lambda_{\text{рз}} = \frac{n}{\Delta t}, \quad (5.14)$$

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 (5.13).

Зависимость интенсивности отказов от времени в технике называется λ -характеристикой. Типичный вид λ -характеристики радиоэлектронных устройств приведен на рис.5.9.

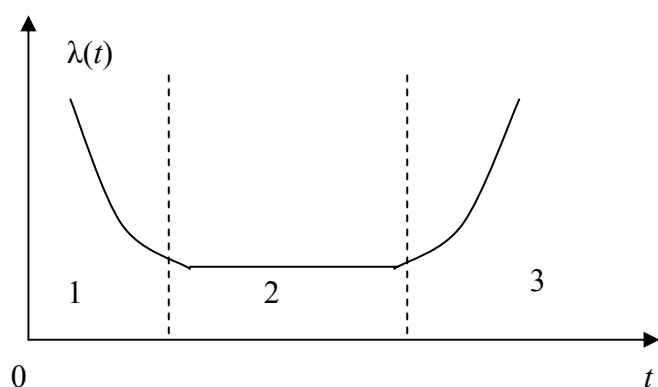


Рис.5.9.Типичный вид λ -характеристики РЭУ

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, организовав в условиях производства термоэлектро-

тренировку, 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 расчеты надежности 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 [23]:

$$\lambda(t) = \frac{w(t)}{P(t)} \quad (5.15)$$

5.10. Нарботка на отказ (средняя наработка на отказ)

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

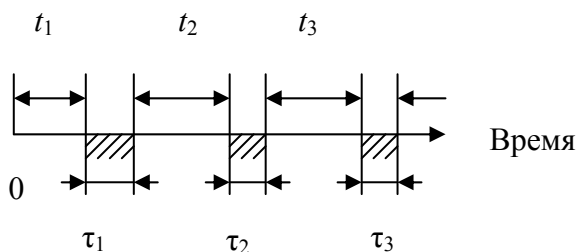


Рис.5.10. Процесс функционирования РЭУ: t_1, t_2, t_3 – интервалы безотказной работы РЭУ; τ_1, τ_2, τ_3 – интервалы по устранению отказов

отказы 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.5.10).

Тогда под наработкой на отказ понимают величину, определяемую как

$$T_0 = \frac{\sum_{i=1}^m t_i}{m}, \quad (5.16)$$

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 (5.16).

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

$$T_0 = \frac{\sum_{j=1}^M T_j}{\sum_{j=1}^M m_j}, \quad (5.17)$$

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 [8,20 и др.]

5.11. Среднее время безотказной работы

Надежность 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

$$T_{\text{ср}} = \frac{\sum_{i=1}^N T_i}{N}, \quad (5.18)$$

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 надежности они совпадают по значению.

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

$$T_{\text{ср}} = \int_0^{\infty} P(t) dt, \quad (5.19)$$

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 учетом того, что $\lambda = 1/T_0$, получим

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

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

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

5.12. 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

$$\mu(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{M[n(t + \Delta t) - n(t)]}{\Delta t}, \quad (5.20)$$

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

$$\mu^*(t) = \frac{n(t_2) - n(t_1)}{t_2 - t_1}, \quad (5.21)$$

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

5.13. 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.5.10).

Пусть за определенный календарный период эксплуатации РЭУ произошло m отказов. На восстановление РЭУ после возникновения i -го отказа затрачивалось время τ_i (см. рис.5.10). Тогда среднее время восстановления РЭУ может быть подсчитано как

$$T_B = \frac{\sum_{i=1}^m \tau_i}{m}. \quad (5.22)$$

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

$$v(\tau_3) = \text{Вер}\{T \leq \tau_3\}, \quad (5.23)$$

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

$$v(\tau_3) = \int_0^{\tau_3} w(\tau) d\tau. \quad (5.24)$$

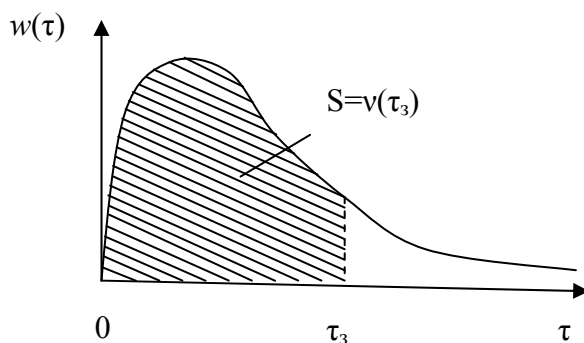


Рис. 5.11. К вопросу об определении величины $v(\tau_3)$

Графическую интерпретацию выражения (5.24) можно понять из рис.5.11.

5.14. Эксплуатационные коэффициенты надежности

Эксплуатационные коэффициенты надежности относятся к комплексным показателям надежности, т.е. показателям характеризующим несколько свойств, составляющих надежность РЭУ.

Под **коэффициентом готовности** K_r 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

$$K_r = \frac{\sum_{i=1}^m t_i}{\sum_{i=1}^m t_i + \sum_{i=1}^m \tau_i}. \quad (5.25)$$

где t_i – время безотказной работы между $(i-1)$ и i -м отказом (см. рис. 5.10);

τ_i – время восстановления i -го отказа (см. рис. 5.10);

m – количество отказов за рассматриваемый период.

Разделив числитель и знаменатель приведенной формулы на m и воспользовавшись формулами (5.16) и (5.22), получим

$$K_r = \frac{T_0}{T_0 + T_v}. \quad (5.26)$$

Физически коэффициент K_r 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

$$K_{\text{и}} = \frac{\sum_{i=1}^m t_i}{\sum_{i=1}^m t_i + \sum_{i=1}^m t_{\text{п}i}}. \quad (5.27)$$

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:

$$K_{\text{и}} = \frac{\sum_{i=1}^m t_{\text{п}i}}{\sum_{i=1}^m t_i + \sum_{i=1}^m t_{\text{п}i}}. \quad (5.28)$$

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

5.15. Надежность элементов РЭУ

5.15.1. Интенсивность отказов как основная характеристика надежности элементов

При расчете показателей надежности аппаратуры надо располагать данными о показателях надежности элементов.

Основной характеристикой надежности элементов, приводимой в справочниках (технических условиях и других 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

$$\lambda(t) = \frac{\lambda e^{-\lambda t}}{e^{-\lambda t}} = \lambda = \text{const}. \quad (5.29)$$

Из выражения (5.29) видно, что при экспоненциальном распределении времени до отказа интенсивность отказов постоянна и численно равна параметру экспоненциального распределения. Поэтому интенсивность отказов и параметр экспоненциального распределения обозначены одной и той же буквой – λ . Таким образом, стало возможным в справочниках задать надежность элементов одним числом – значением интенсивности отказов.

Интенсивность отказов элементов определяют обычно опытным путем для номинального 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 [8]

$$\lambda^* = \frac{V}{\sum_{i=1}^V t_i + (N + V)T}. \quad (5.30)$$

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

V – количество отказавших элементов.

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

Знаменатель формулы (5.30), примерно равный $N \cdot T$, называют количеством отработанных приборо-часов (элементо-часов).

Нетрудно установить, что для того, чтобы подтвердить экспериментально значение $\lambda=10^{-6}$ 1/ч, значение величины $N \cdot T$ должно быть равным 10^7 . Предположим, что $N = 1000$, тогда $T = 10000$ ч, что составляет более года. Поэтому на практике используют ускоренные (обычно форсированные) испытания, позволяющие получить ту же информацию о надежности, но за более короткий срок. Ускорение испытаний может достигать 50...100 и даже более единиц.

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

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

Интенсивность отказов современных элементов занимает примерно диапазон $10^{-10} \dots 10^{-5}$ 1/ч (прил.2).

За рубежом в качестве размерности величины λ используют также процент на 1000 ч работы, что равносильно введению множителя 10^5 .

5.15.2. Коэффициенты электрической нагрузки элементов

Замечено, что надежность 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

$$K_{\text{н}} = \frac{F_{\text{раб}}}{F_{\text{ном}}}. \quad (5.31)$$

где $F_{\text{раб}}$ — электрическая нагрузка элемента в рабочем режиме, т.е. 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 надежность. Например, для резисторов в качестве характеристики берут мощность рассеивания, для конденсаторов — напряжение, прикладываемое к обкладкам.

Пример 5.1. В коллекторную цепь транзистора (рис.5.12) предполагается поставить резистор типа С2–23 со значением сопротивления $1\text{кОм} \pm 10\%$ и номинальной мощностью рассеивания $0,5\text{Вт}$.

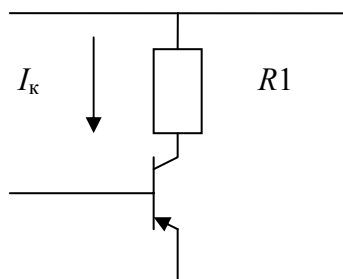


Рис.5.12. К расчету коэффициента нагрузки резистора

Ток, протекающий в коллекторной цепи транзистора I_k , равен 10мА . Требуется определить, какое значение коэффициента нагрузки будет иметь место для выбираемого резистора.

Решение. Как отмечалось, для резисторов в качестве характеристики F в формуле (5.31) используют мощность рассеивания. Тогда для коэффициента нагрузки резистора

$$K_n = \frac{F_{\text{раб}}}{F_{\text{ном}}}.$$

По условию примера $R1=1\text{кОм} \pm 10\%$, т.е. 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 $P_{\text{раб}}$, т.е. то значение мощности рассеивания, которое будет иметь место на схемном элементе $R1$ (см. рис.5.12). Применительно к рассматриваемому примеру

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

Тогда значение коэффициента нагрузки определится как

$$K_n = \frac{F_{\text{раб}}}{F_{\text{ном}}} = \frac{0,1}{0,5} = 0,2,$$

т.е. в данном случае резистор будет нагружен на 20% от номинальных возможностей.

5.15.3. 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 надежность этого элемента. Формулы, которыми можно пользоваться для определения коэффициентов

электрической нагрузки основных элементов РЭУ, приведены в табл.5.4.

Таблица 5.4

Формулы для определения коэффициентов электрической нагрузки элементов

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

Для транзисторов, диодов и аналоговых ИМС в качестве определяющего параметра выбирается тот, для которого $K_n \geq 0,05 \dots 0,1$. 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).

5.15.4. Краткая характеристика надежности элементов

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

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

Надежность ИМС слабо зависит от степени интеграции, т.е. от числа элементов в ИМС. Объясняется это тем, что значительный вклад в ненадежность ИМС вносят корпус и межсоединения, а таковые 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 надежность мощных полупроводниковых приборов во многом зависит от качества припайки кристалла к корпусу.

Надежность 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 объемного сопротивления надежнее пленочных, однако последние более стабильны. Замечено, что надежность резистора зависит от характера протекающего тока, а также от номинального значения сопротивления. Высокоомные резисторы менее надежны.

Надежность 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 надежность конденсаторов зависит от их места в электрической схеме (разделительный, блокировочный, контурный или накопительный). Экспериментально установлено, что для конденсаторов справедлив закон "десяти градусов". Суть закона: характеристика надежности 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 может задаваться 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 разъема при номинальном токе через штырь;
- для монтажных и соединительных проводов, кабелей — значением λ , приходящимся на каждый метр длины при номинальной плотности тока в проводе.

5.15.5. Учет влияния на надежность 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 надежности РЭУ коэффициенты нагрузки элементов выбирают меньше единицы, а условия эксплуатации элементов оказываются более жесткими, нежели нормальные. Поэтому возникает задача пересчета справочных значений интенсивностей отказов на конкретный электрический режим и условия эксплуатации.

В общем случае для пересчета пользуются выражением

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

где $\lambda(v)$ — значение интенсивности отказов с учетом электрического режима и условий эксплуатации (символ v подчеркивает это);

λ_0 — справочное значение интенсивности отказов;

$y(x_1, \dots, x_m)$ — пересчетная 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 пересчетной функции наиболее часто используют выражение (модель) вида

$$y(x_1, \dots, x_m) = \prod_{i=1}^m \alpha(x_i), \quad (5.32)$$

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.3). Вид этих номограмм показан на рис.5.13.

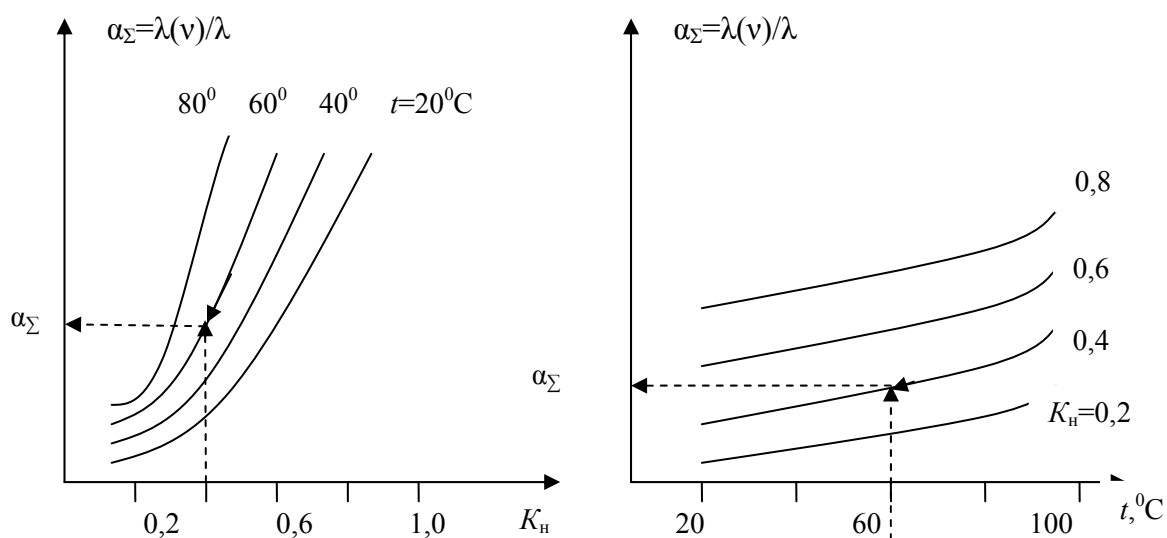


Рис.5.13. Номограммы для определения произведения поправочных коэффициентов в случае учета двух факторов – коэффициента нагрузки и температуры

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

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

$$\lambda(v) \approx K_n^b \cdot \lambda_0, \quad (5.33)$$

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 $b=1$)

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

5.16. Оценка показателей надежности проектируемых РЭУ (основные расчетные соотношения)

Эти соотношения получают в предположении, что элементы в РЭУ с точки зрения надежности соединены последовательно (рис.5.14). Кроме того, отказы элементов считаются случайными и

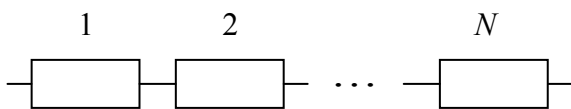


Рис. 5.14. Последовательное соединение элементов в РЭУ (N — количество элементов)

независимыми друг от друга. Тогда с учетом принятых допущений методами теории вероятностей для вероятности безотказной работы устройства за время t_3 можно получить следующее выражение:

$$P_{\Sigma}(t_3) = p_1(t_3) \cdot p_2(t_3) \dots p_N(t_3) = \prod_{i=1}^N p_i(t_3), \quad (5.34)$$

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

Из выражения (5.34) видно, что для определения показателя безотказности устройства необходимо располагать данными о безотказности элементов, входящих в устройство.

В случае экспоненциального закона надежности элементов

$$p_i(t_3) = e^{-\lambda_i t_3}, \quad (5.35)$$

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

Подставляя выражения вида (5.35) в соотношение (5.34), получим

$$P_{\Sigma}(t_3) = e^{-\lambda_1 t_3} \cdot e^{-\lambda_2 t_3} \dots e^{-\lambda_N t_3} = e^{-t_3 \sum_{i=1}^N \lambda_i}. \quad (5.36)$$

Из выражения (5.36) следует, что вероятность безотказной работы устройства может быть определена с использованием значений интенсивностей отказов элементов.

В выражении (5.36) 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 безотказности устройства.

Выражение вида (5.34) называют основным расчетным для вероятности безотказной работы устройств. Выражение (5.36) — аналог выражения (5.34) применительно к экспоненциальному закону надежности элементов.

Для среднего времени восстановления радиоэлектронного устройства может быть получено выражение

$$T_B = \frac{\sum_{i=1}^N q_i \tau_i}{\sum_{i=1}^N q_i}, \quad (5.37)$$

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

$$T_B = \left| \begin{array}{l} \text{при } \lambda_i \cdot t_3 \ll 1 \\ q_i = q_i(t_3) \approx \lambda_i \cdot t_3 \end{array} \right| \approx \frac{t_3 \sum_{i=1}^N \lambda_i \tau_i}{t_3 \sum_{i=1}^N \lambda_i} = \frac{\sum_{i=1}^N \lambda_i \tau_i}{\sum_{i=1}^N \lambda_i}. \quad (5.38)$$

Выражение (5.38) является основным расчетным соотношением для определения среднего времени восстановления РЭУ.

5.17.Ориентировочный (приближенный) расчет показателей надежности проектируемых РЭУ

Существующие методы расчета показателей надежности РЭУ различаются степенью точности учета электрического режима и условий эксплуатации элементов.

При ориентировочном расчете этот учет выполняется приближенно, с помощью обобщенных эксплуатационных

коэффициентов. Значения этих коэффициентов зависят от вида РЭУ и условий их эксплуатации.

Ориентировочный расчет выполняется на начальных стадиях проектирования РЭУ, когда еще не выбраны типы и эксплуатационные характеристики элементов, не спроектирована конструкция и, естественно, отсутствуют результаты конструкторских расчетов (теплового режима, виброзащищенности и т.п.).

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

Ориентировочный расчет 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 расчете пользуются следующими допущениями (предпосылками):

- а) отказы элементов случайны и независимы;
- б) для элементов РЭУ справедлив экспоненциальный закон надежности, т.е. выражения (5.35);
- 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) учет электрического режима и условий эксплуатации элементов выполняется приближенно.

Последовательность ориентировочного расчета:

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, маломощные транзисторы объединяют в одну группу, мощные – в другую и т.д.

Монтажные соединения составляют отдельную группу. Если вид монтажа (печатный, объемный) определен 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

$$\lambda_{\Sigma} = \sum_{j=1}^k \lambda_{0j} \cdot n_j, \quad (5.39)$$

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 обобщенного эксплуатационного коэффициента выполняют приближенный учет электрического режима и условий эксплуатации элементов.

Суммарную интенсивность отказов элементов РЭУ с учетом электрического режима и условий эксплуатации определяют как

$$\lambda_{\Sigma}(v) = \lambda_{\Sigma} \cdot K_{\Sigma} = K_{\Sigma} \cdot \sum_{j=1}^k \lambda_{0j} \cdot n_j, \quad (5.40)$$

где K_{Σ} – обобщенный эксплуатационный коэффициент, выбираемый по таблицам в зависимости от вида РЭУ или условий его эксплуатации (табл. 5.5).

Таблица 5.5

Значения обобщенного эксплуатационного коэффициента K_{Σ} [25]

Вид РЭУ, условия эксплуатации	Значение K_{Σ}
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.5.5 указаны значения, рекомендуемые для использования в расчетах.

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

Наработка на отказ

$$T_0 = \frac{1}{\lambda_{\Sigma}(v)}. \quad (5.41)$$

Вероятность безотказной работы за заданное время t_3

$$P_{\Sigma}(t_3) = e^{-t_3 \cdot \lambda_{\Sigma}(v)} = e^{-\frac{t_3}{T_0}}. \quad (5.42)$$

Среднее время безотказной работы устройства (средняя наработка до отказа)

$$T_{cp} = T_0.$$

В общем случае гамма-процентная наработка до отказа T_{γ} определяется, как решение уравнения

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

При экспоненциальном распределении времени до отказа

$$T_{\gamma} = -\frac{\ln\left(\frac{\gamma}{100}\right)}{\lambda_{\Sigma}(v)} = -T_0 \ln\left(\frac{\gamma}{100}\right). \quad (5.43)$$

5.18 Расчет показателей надежности проектируемых РЭУ с учетом коэффициентов электрической нагрузки и условий работы элементов в составе устройств

Этот расчет, называемый также уточненным расчетом показателей надежности, выполняют на заключительных стадиях проектирования РЭУ, когда выбраны типы и типоразмеры элементов, спроектирована конструкция и имеются результаты расчета тепловых режимов, виброзащищенности и т.п. Напомним, что типоразмер элемента определяется основной электрической эксплуатационной характеристикой элемента (например, для резисторов – мощностью рассеивания, для конденсаторов – допустимым напряжением).

Расчет 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 расчета:

1. Определяют коэффициенты электрической нагрузки элементов РЭУ. Пользуются общей формулой (5.31) или ее конкретными реализациями, приведенными в табл.5.4. 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 расчета принципиальной электрической схемы РЭУ или получают путем экспресс-анализа (ориентировочной оценки) электрических нагрузок схемных элементов. Допускается погрешность $\pm(20\ldots30)\%$.

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

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

3. Формируются группы однотипных элементов (если представляется возможность сделать это).

Признаками объединения элементов в одну группу в данном расчете 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 $K_n \leq 0,05$, то такие элементы по коэффициенту электрической нагрузки допускается объединять в одну группу.

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

$$\lambda_j(v) = \lambda_{0j} \prod_{i=1}^m \alpha(x_i); \quad (5.44)$$

$$\lambda_{\Sigma}(v) = \sum_{j=1}^k n_j \lambda_j(v), \quad (5.45)$$

где $\lambda_j(v)$ – интенсивность отказов элементов j -ой группы с учетом электрического режима и условий эксплуатации;

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

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

- k – число сформированных групп однотипных элементов; в предельном случае каждый элемент РЭУ может составить отдельную группу;
- $\alpha(x_i)$ – поправочный коэффициент, учитывающий влияние фактора x_i ; $i=1, \dots, m$;
- m – количество факторов, принимаемых во внимание.

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_0 , $P_\Sigma(t_3)$, $T_{ср}$, T_γ .

6. Подсчитывают показатели восстанавливаемости РЭУ. Среднее время восстановления подсчитывают по формуле (5.38). Вероятность восстановления РЭУ за заданное время t_3 рассчитывают по выражению (5.24) в предположении, что время восстановления распределено по экспоненциальному закону. Расчетная формула в этом случае принимает вид

$$v(t_3) = 1 - e^{-\frac{t_3}{T_B}}. \quad (5.46)$$

7. При необходимости подсчитывают коэффициент готовности K_r и вероятность нормального функционирования $P_{н.ф.}(t_3)$. Пользуются формулами [24]

$$K_r = \frac{T_0}{T_0 + T_B}; \quad P_{н.ф.}(t_3) \approx K_r \cdot P_\Sigma(t_3).$$

5.19 Примеры оценки показателей надежности проектируемого РЭУ

Пример 5.2. Требуется оценить показатели безотказности усилительного каскада (рис.5.15), 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.

Решение. Выполним ориентировочный расчет показателей надежности 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 выбран (алюминиевый или танталовый). Для резисторов

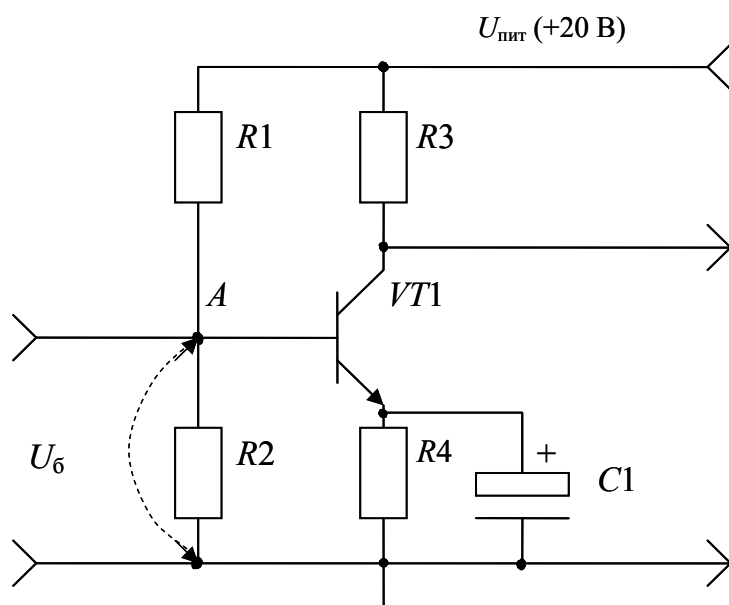


Рис.5.15. Электрическая принципиальная схема усилительного каскада

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.5.6.

Таблица 5.6

К примеру ориентировочного расчета показателей надежности

Группа элементов	Количество элементов в j -й группе n_j	Интенсивность отказов для элементов j -й группы $\lambda_{0j}, \times 10^{-6} \text{ 1/ч}$	Произведение $\lambda_{0j} \cdot n_j, \times 10^{-6} \text{ 1/ч}$
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 паяк определено как суммарное число выводов элементов и внешних выводов каскада. Из табл.5.6 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 обобщенного эксплуатационного коэффициента, найденного по справочным таблицам для наземных стационарных условий (см. табл.5.5), скорректируем величину λ_{Σ} , учтя тем самым приближенно электрический режим и условия работы элементов каскада. Примем $K_9 = 3,0$ (см. табл.5.5). 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 надежности подсчитываем другие показатели безотказности:

а) наработка каскада на отказ

$$T_0 = \frac{1}{\lambda_{\Sigma}(v)} = \frac{1}{5,8 \cdot 10^{-6}} \approx 172400 \text{ ч};$$

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 5.3. Выполним уточненный расчет показателей безотказности усилительного каскада, рассмотренного в примере 5.2 [26].

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 $P_{\text{ном}} = 0,125 \text{ Вт}$ и допуском на сопротивление $\pm 10\%$. Тип выбранного конденсатора К50-6 с допустимым напряжением $U_{\text{ном}} = 6 \text{ В}$. Тип транзистора VT1 – КТ301Д. Напряжение источника питания $U_{\text{пит}} = 20 \text{ В} \pm 10\%$.

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

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

Расчет 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.5.4. Номинальные или допустимые по ТУ

эксплуатационные электрические характеристики, используемые в формулах табл.5.4 для резисторов и конденсатора, указаны в условии примера, а именно: для резисторов $P_{\text{ном}}=0,125$ Вт; для конденсатора $U_{\text{ном}}=6$ В.

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

постоянный ток коллектора $I_{\text{к}}=10$ мА;

постоянное напряжение между коллектором и эмиттером $U_{\text{кэ}}=30$ В;

мощность, рассеиваемая на коллекторе при температуре $+60$ °С, $P_{\text{доп}} = 150$ мВт;

мощность, рассеиваемая на коллекторе при температуре $+85$ °С, $P_{\text{доп}} = 58$ мВт;

при повышении температуры от $+60$ до $+85$ °С допустимая мощность снижается линейно, т.е. по закону

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

где t° – температура окружающей среды, °С

Значения электрических характеристик элементов в рабочем режиме определим, выполнив экспресс-анализ (приближенный расчет) электрического режима рассматриваемого усилительного каскада (см. рис.5.15).

Экспресс-анализ для простоты иллюстрации выполним для средних значений параметров элементов. При детальном инженерном анализе следует учитывать экстремальные условия при нагрузке всех элементов. С методикой такого анализа можно ознакомиться, например, в работе [18].

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

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

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

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

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

Для расчетов 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 $R2$

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

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 $I_{R4} = I_{\text{э}} \approx I_{\text{к}}$)

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

Напряжение на конденсаторе

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

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.5.4 с учетом 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 надежность, являются как ток коллектора, так и прикладываемое к нему напряжение. Поэтому учет электрической нагруженности транзистора выполним с помощью коэффициента электрической нагрузки по мощности. Для подсчета указанного коэффициента необходимо располагать значением $P_{\text{доп}}$, соответствующим максимальной рабочей температуре транзистора. Эту температуру определим как

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

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

Получим

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

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.5.7.

Таблица 5.7

К примеру расчета показателей надежности

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_n	Макс. рабочая температура, °С	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 учете 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.5.7).

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

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

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

Δt_3° – перегрев в нагретой зоне устройства;

для нетеплонагруженных элементов (конденсатор, печатная плата, пайки)

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

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

Расчетные значения температуры элементов внесены в табл.5.7.

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 (5.44), (5.45). При этом справочные значения интенсивностей отказов элементов каждой группы находим с использованием прил.2, а поправочные коэффициенты, учитывающие влияние коэффициентов электрической нагрузки и температуры, определяем по номограммам, приведенным в прил.3 на рис.ПЗ.1-ПЗ.3.

Результаты расчетов сведены в табл.5.7.

Расчетное 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_v по формуле

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

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

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

Расчет величины T_v с использованием данных прил. 4 и табл. 5.7 сведен в табл. 5.8.

С учетом того, что

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

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

Таблица 5.8

К примеру расчета 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)

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

5.20. Расчет показателей надежности при разных законах распределения времени до отказа элементов

Изложенные выше методики оценки показателей надежности проектируемых РЭУ исходят из того, что для элементов имеет место экспоненциальный закон надежности, 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 с заметным износом конструктивных частей – элементы коммутации, механические элементы);

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

Полной информации о законах распределения времени до отказа элементов пока нет. При расчете показателей безотказности РЭУ в случае различных законов распределения времени до отказа элементов пользуются основным расчетным 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 учетом 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 учет коэффициентов электрической нагрузки и условий работы элементов, как отмечалось выше, выполняется путем 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 учетом 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

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

где ρ, β – параметры распределения (β – коэффициент формы).

Справочными показателями надежности должны быть ρ и β .

Учет коэффициентов электрической нагрузки и условий эксплуатации элементов может выполняться путем корректировки параметра ρ , используя выражение

$$\rho_i(v) = \rho_{0i} \prod_{j=1}^m \alpha(x_j), \quad (5.47)$$

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 подсчета $p_i(t_3)$ в случае закона Вейбулла может быть получена в виде

$$p_i(t_3) = e^{-t_3^\beta \rho_i(v)}. \quad (5.48)$$

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.

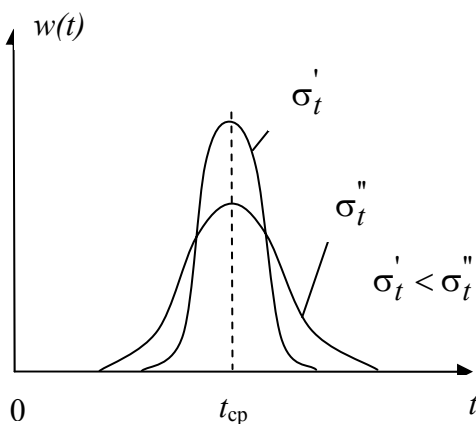


Рис.5.4. График плотности распределения

3. Нормальный закон.

График плотности распределения времени до отказа в этом случае имеет вид, показанный на рис.5.16.

Параметрами распределения 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

надежности (безотказности) i -го элемента.

Учет коэффициентов электрической нагрузки и условий эксплуатации элементов можно выполнить путем корректировки показателя $t_{\text{ср}}$, используя выражение

$$t_{\text{ср}.i}(v) = \frac{t_{\text{ср}.i}^{(0)}}{\prod_{j=1}^m \alpha(x_j)}, \quad (5.49)$$

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

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

$t_{\text{ср}.i}^{(0)}$ – справочное значение $t_{\text{ср}.i}$.

Экспериментальные данные о значениях поправочных коэффициентов для показателя $t_{\text{ср}}$ в настоящее время отсутствуют.

Значение $p_i(t_3)$ может быть определено как

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

$$1 - \Phi\left(\frac{t_3 - t_{\text{ср}.i}}{\sigma_{ti}}\right) = \left| \begin{array}{l} \text{в зависимости} \\ \text{от свойства} \\ \text{функции} \\ \Phi(\dots) \end{array} \right| = \Phi\left(\frac{t_{\text{ср}.i} - t_3}{\sigma_{ti}}\right), \quad (5.50)$$

где $\Phi(\dots)$ – табличная функция стандартного нормального распределения (см. табл. П1.1, прил. 1).

Смысл приведенной формулы понятен из рис. 5.17.

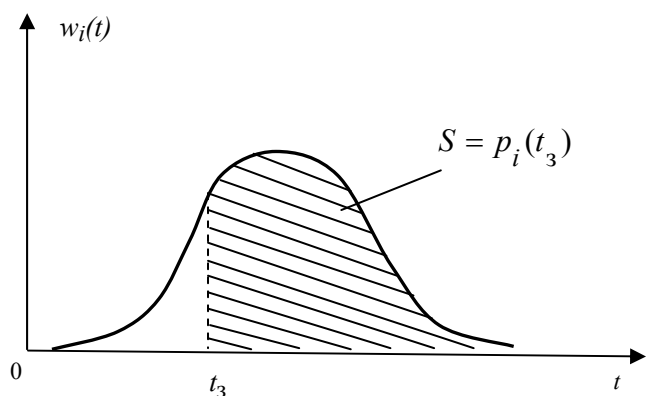


Рис. 5.17. К определению вероятности $p(t_3)$

4. 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, используя выражения, приведенные в подразд. 2.2.4.

5.21. Параметрическая надежность РЭУ

5.21.1. Параметрическая надежность и функционирование РЭУ

Под *параметрической надежностью* РЭУ будем понимать вероятность отсутствия в изделии постепенных отказов при его работе в заданных условиях эксплуатации в течение времени t_3 . Понятие параметрической надежности прямо связано с понятием постепенных отказов.

Для аналоговых РЭУ постепенный отказ проявляется в снижении эффективности использования устройств. Например, предположим, что согласно техническим условиям чувствительность радиоприемного 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 радиоприемного устройства принимать слабые сигналы снизилась, т.е. можно говорить о снижении эффективности его использования. В данном случае зафиксировать наступление постепенного отказа можно путем измерения уровня чувствительности с помощью контрольно-измерительных приборов. Но если чувствительность ухудшится еще в большей степени и станет равной, например 900 мкВ/м, то весьма вероятно, что мы и на слух почувствуем: с чувствительностью радиоприемного устройства что-то не так.

Применительно к цифровым РЭУ постепенный отказ может вызвать 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.

5.21.2. Причины, обуславливающие появление постепенных отказов

Основными причинами, вызывающими возникновение постепенных отказов, являются следующие:

- производственный разброс выходного параметра, вызываемый действием производственных погрешностей параметров элементов;

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

- 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

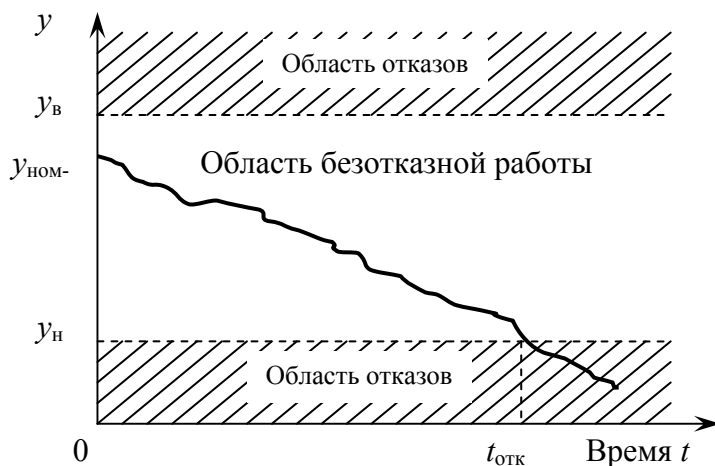


Рис.5.18. Изменение выходного параметра при эксплуатации РЭС

приятый, согласно установленному для данных РЭУ графику (так называемых регламентных работ), а также в процессе эксплуатации РЭУ.

5.22. Оценка параметрической надежности РЭУ на этапе проектирования

Точный расчет уровня параметрической надежности 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 учетом действия дестабилизирующих факторов” будем понимать худший случай с точки зрения параметрической надежности изделия в интервале времени от $t = 0$ до $t = t_3$ в заданных условиях эксплуатации.

В инженерных расчетах 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 может произойти дальнейшее изменение выходного параметра. В итоге его значение может достигнуть критической границы и затем выйти за нее (рис.5.18). Наступит постепенный отказ (момент времени $t_{отк}$).

Постепенные отказы выявляют и устраняют в основном в процессе профилактических меро-

воздействием дестабилизирующих факторов изменяются параметры нормального закона. Обычно происходит смещение среднего значения выходного параметра и изменяется степень его рассеивания относительно нового среднего значения (рис.5.19).

Здесь приняты следующие обозначения:

- $w(y/t=0)$ – функция плотности распределения выходного параметра y в момент времени $t=0$ без учета 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 учетом действия дестабилизирующих факторов.

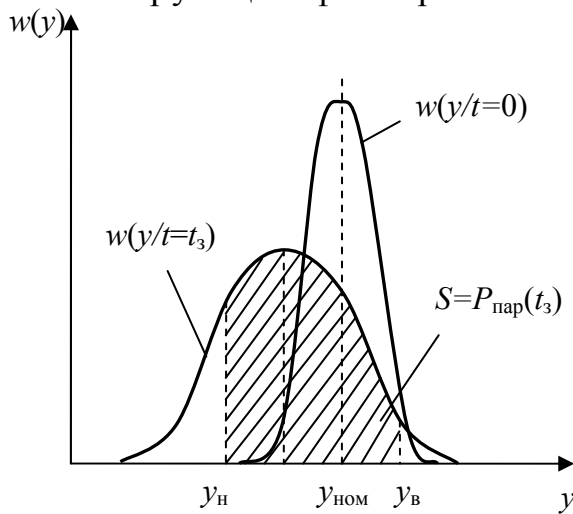


Рис.5.19. Влияние процесса эксплуатации на распределение выходного параметра РЭУ:
 y_n , y_v – нижняя и верхняя допустимые границы

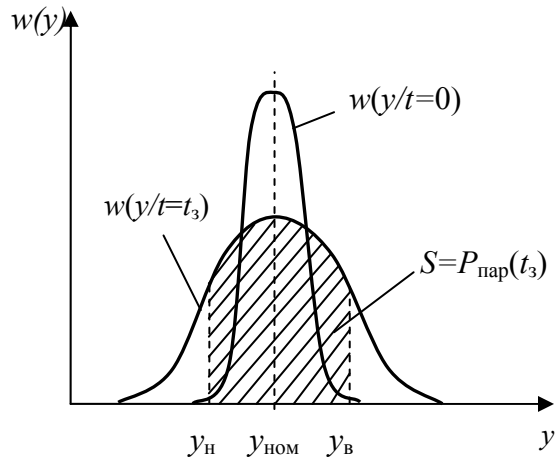


Рис.5.20. Изменение рассеивания выходного параметра при эксплуатации РЭУ

В ряде случаев смещения среднего (номинального) значения выходного параметра не происходит, а изменяется (как правило, возрастает) степень рассеивания этого параметра около среднего значения (рис.5.20). Пусть допуск на выходной параметр y задан, исходя из служебного назначения РЭУ, нижней y_n и верхней y_v границами. Тогда вероятность, с которой гарантируется отсутствие постепенного отказа в течение промежутка времени $(0...t_3)$ численно равна заштрихованной площади (рис.5.19, 5.20).

Воспользуемся гипотезой о нормальном распределении выходного параметра y . Искомую вероятность $P_{\text{пар}}(t_3)$ определим с помощью формулы (см. подразд. 2.2.2, с.20)

$$P(a \leq y \leq b) = \Phi\left(\frac{b - m}{\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{a - m}{\sigma}\right), \quad (5.51)$$

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 ($m=0$; $\sigma=1$); эта функция подробно рассмотрена в подразд.2.2.2.

Применительно к рассматриваемой задаче параметры в формуле (5.51) примут значения:

$$a=y_{\text{н}}; \quad b=y_{\text{в}}; \quad m=M(y/t=t_3); \quad \sigma=\sigma(y/t=t_3),$$

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

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

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

$$P_{\text{пар}}(t_3) = \Phi\left[\frac{y_{\text{в}} - M(y/t=t_3)}{\sigma(y/t=t_3)}\right] - \Phi\left[\frac{y_{\text{н}} - M(y/t=t_3)}{\sigma(y/t=t_3)}\right]. \quad (5.52)$$

Если при анализе параметрической надежности использовать относительные погрешности выходного параметра, то расчетная формула может быть получена по аналогии с формулой (5.52), согласно рис.5.21.

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 входного параметра, задаваемая исходя из служебного назначения РЭУ.

Тогда, используя выражение (5.51), можно записать:

$$P_{\text{пар}}(t_3) = \Phi\left[\frac{\delta - M\left(\frac{\Delta y}{y}/t=t_3\right)}{\sigma\left(\frac{\Delta y}{y}/t=t_3\right)}\right] - \Phi\left[\frac{-\delta - M\left(\frac{\Delta y}{y}/t=t_3\right)}{\sigma\left(\frac{\Delta y}{y}/t=t_3\right)}\right]. \quad (5.53)$$

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 (5.53) упрощается и примет вид

$$\begin{aligned}
 P_{\text{пар}}(t_3) &= \Phi \left[\frac{\delta}{\sigma \left(\frac{\Delta y}{y} / t = t_3 \right)} \right] - \Phi \left[\frac{-\delta}{\sigma \left(\frac{\Delta y}{y} / t = t_3 \right)} \right] = \\
 &= 2\Phi \left[\frac{\delta}{\sigma \left(\frac{\Delta y}{y} / t = t_3 \right)} \right] - 1. \quad (5.54)
 \end{aligned}$$

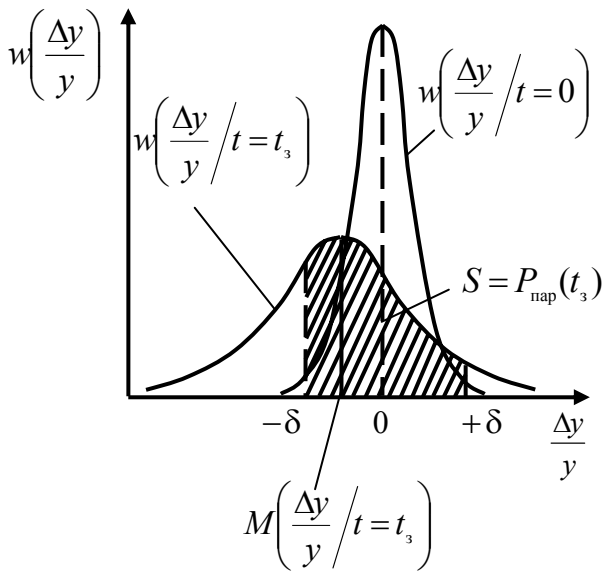


Рис. 5.21. Влияние процесса эксплуатации на распределение относительной погрешности выходного параметра

Для того, чтобы воспользоваться формулами (5.52)-(5.54), 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 величины $\Delta y/y$ 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

определить указанные характеристики на примере рассмотрения относительной погрешности $\Delta y/y$. Это прямо связано с расчетом эксплуатационного отклонения величины $\Delta y/y$.

Используя формулу (см. подразд.4.8)

$$M\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{T\pm} = \Delta T \sum_{i=1}^n B_i \cdot M(\alpha_i), \quad (5.55)$$

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

$$M\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{\text{ст}} = \Delta\tau \cdot \sum_{i=1}^n B_i \cdot M(c_i) \quad (5.56)$$

подсчитывают среднее значение $\Delta y/y$, обусловленное действием старения.

В формулах (5.55), (5.56) $M(\alpha_i)$ 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 $M(\Delta y/y)_{\text{ст}}$ приемами, рассмотренными в подразд.4.9, используя выражения

$$\left. \begin{aligned} M\left(\frac{\Delta y}{y} / t = t_3\right)_{\Sigma+} &= M\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{\text{пр}} + M\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{T+} + M\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{\text{ст}+} ; \\ M\left(\frac{\Delta y}{y} / t = t_3\right)_{\Sigma-} &= M\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{\text{пр}} + M\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{T-} + M\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{\text{ст}-} . \end{aligned} \right\} \quad (5.57)$$

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

$$\sigma\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{\Sigma} = \sqrt{\sigma^2\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{\text{пр}} + \sigma^2\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{T\pm} + \sigma^2\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{\text{ст}}}, \quad (5.58)$$

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

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

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

Знаки \pm при индексе T в формуле (5.58) 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 (5.58) справедливо для случая, когда рассматриваются два дестабилизирующих фактора (время и температура), а также в предположении, что между указанными погрешностями отсутствует корреляция.

Расчет $\sigma\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{\text{пр}}$ может быть выполнен с использованием выражения (4.11). Для расчета $\sigma\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_T$ и $\sigma\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{\text{ст}}$ можно воспользоваться формулами

$$\sigma\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_T \approx \frac{1}{3} |\Delta T| \sqrt{\sum_{i=1}^n B_i^2 \cdot \delta^2(\alpha_i)}, \quad (5.59)$$

$$\sigma\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{\text{ст}} \approx \frac{1}{3} \Delta \tau \sqrt{\sum_{i=1}^n B_i^2 \cdot \delta^2(c_i)}. \quad (5.60)$$

Описание параметров, используемых в формулах (5.59) и (5.60), приведено в подразд. 4.8. Формулы 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 указанной гипотезы в большинстве практических случаев оправдано. Если же между температурными коэффициентами первичных параметров существует корреляция, то формула (5.59) примет вид

$$\sigma\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_T \approx \frac{1}{3} |\Delta T| \sqrt{\sum_{i=1}^n B_i^2 \cdot \delta^2(\alpha_i) + 2 \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j \\ i < j}}^n r_{ij} B_i B_j \delta(\alpha_i) \delta(\alpha_j)}, \quad (5.61)$$

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

Запись $i < j$ в выражении (5.61) означает, что рассматриваются все неповторяющиеся сочетания пар первичных параметров, причем $i \neq j$.

В случае учета корреляции между коэффициентами старения первичных параметров формула (5.60) должна быть дополнена слагаемым под квадратным корнем по аналогии с выражением (5.61).

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 (5.52)-(5.54), далее можно определить по выражениям

$$M\left(\frac{\Delta y}{y} / t = t_3\right) = \frac{M\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{\Sigma+} + M\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{\Sigma-}}{2}; \quad (5.62)$$

$$\sigma\left(\frac{\Delta y}{y} / t = t_3\right) = \sigma\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{\Sigma} + \frac{M\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{\Sigma+} - M\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{\Sigma-}}{6}. \quad (5.63)$$

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 учета двух важнейших эксплуатационных факторов – температуры и времени (старения).

Если требуется учесть влияние двух других факторов, не принятых во внимание при расчете, 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 (5.62) и (5.63), 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 учетом коэффициента запаса ξ , можно также определить на этапе расчета эксплуатационного допуска по формуле (4.32), используемой 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 (5.52)-(5.54):

$$M\left(\frac{\Delta y}{y}/t=t_3\right) = \frac{\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_н + \left(\frac{\Delta y}{y}\right)_в}{2}; \quad (5.64)$$

$$\sigma\left(\frac{\Delta y}{y}/t=t_3\right) = \frac{\delta\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_\Sigma + \frac{M\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{\Sigma+} - M\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{\Sigma-}}{2}}{3}. \quad (5.65)$$

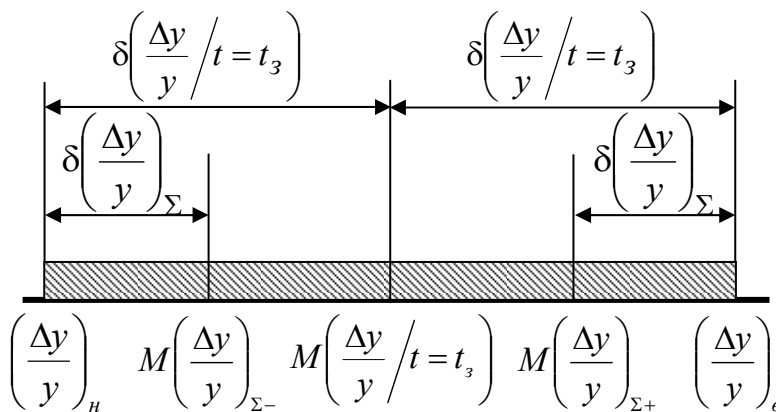


Рис.5.22. Поле эксплуатационного допуска, получаемое расчетным путем

На рис.5.22 заштрихованный диапазон есть поле эксплуатационного допуска с учетом коэффициента запаса ξ . Предполагается, что все характеристики, указанные на рис.5.22, уже пересчитаны с учетом этого коэффициента. Из рис.5.22. понятен смысл формул (5.64) и

(5.65). Так формула (5.65) 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

$$P_{\text{пар}\Sigma(t_3)} = \prod_{j=1}^L P_{\text{пар}j(t_3)}, \quad (5.66)$$

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

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

Выражение (5.66) записано в предположении, что постепенные отказы по разным выходам параметра РЭУ независимы.

Пример 5.4. Для делителя напряжения, рассмотренного в разд.4.5-4.6, определить вероятность, с которой гарантируется отсутствие постепенного отказа. Заданное время работы делителя $t_3 = 1000$ ч. Диапазон рабочих температур $+10..+50$ °С. Параметры резисторов: $R1 = 3$ кОм $\pm 10\%$, $R2 = 2$ 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), равны: $B_{R1} = 0,6$; $B_{R2} = -0,6$.

2. В примере 4.3 (подразд.4.6.3) 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), 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 [17]:

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

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

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

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 (5.59) 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 расчетов выбираем большее значение

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

7. Определяем $M(\Delta q/q)_{\text{ст}}$ по формуле (5.56).

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

8. Принимая гипотезу о нормальном распределении коэффициентов старения и учитывая, что эти коэффициенты некоррелированы, по выражению (5.60) 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 учетом выражения (5.62) и того, что

$$M\left(\frac{\Delta q}{q}\right)_{\Sigma+} = M\left(\frac{\Delta q}{q}\right)_{\Sigma-} = 0, \text{ получим}$$

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

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 (5.58). С учетом 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 (5.63) 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 $\delta = 5\%$. Определяем вероятность, с которой гарантируется отсутствие постепенного отказа. С учетом замечания, сделанного в п.9, применяем формулу (5.54). Получаем

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

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

Вероятность того, что в заданных условиях эксплуатации в 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 $(0 \dots t_3)$ в среднем из каждых 100 делителей лишь у 8-9 экземпляров выходной параметр (коэффициент деления q) выйдет за пределы $q_{\text{ном}} \pm 5\%$.

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 $R2$.

5.23. Использование вероятностных моделей старения параметров РЭУ и элементов

Параметры РЭУ являются случайными функциями времени эксплуатации и хранения. В начальный момент, после изготовления изделия, значения его параметров будут случайными вследствие технологических (производственных) погрешностей. Старение и износ проявляются в сравнительно медленном изменении параметров РЭУ, обычно в одну сторону. Как правило, процесс этот необратимый. Реализация этого процесса — монотонное изменение выходных параметров РЭУ во времени. Но скорость старения для различных экземпляров одного и того вида РЭУ обычно различна и зависит от условий его использования и эксплуатации, конструктивного исполнения, и т.п. Время достижения параметром его допустимой границы будет случайным.

Рассмотрим задачу определения закона распределения времени достижения критических границ при постепенных изменениях параметров. Применение общей теории и методов случайных функций в этом случае затруднительно из-за сложности математических выражений.

Для расчетов устойчивости параметров и надежности РЭУ по постепенным отказам выбирают математическую модель процесса старения. Реализации процессов старения, получаемые экспериментально, в общем случае являются нелинейными. Для приближенных инженерных расчетов применяют линейную аппроксимацию действительных кривых, т.е. предполагают линейные изменения параметра в каждом единичном экземпляре РЭУ в пределах среднего времени между двумя отсчетами.

В этом случае для параметра x как функции времени t , можно записать

$$x(t) = \xi + \eta t, \quad (5.67)$$

где ξ, η — независимые случайные величины;

$\xi = x(t=0)$ — начальное значение параметра $x(t)$; случайность значения ξ определяется производственными причинами;

η — случайная скорость старения или износа, отражает различие исходных свойств материалов и конструкций.

Сформулируем задачу таким образом. Известны законы распределения величин ξ и η . Требуется найти закон распределения времени t достижения параметром $x(t)$ критической границы $x_{кр}$ что позволяет рассчитать вероятность того, что за время t параметр не достигнет критической границы, т.е. оценить

вероятность, отсутствия за время t постепенного отказа по параметру $x(t)$.

Для решения этой задачи выполним построения, показанные на рис. 5.23.

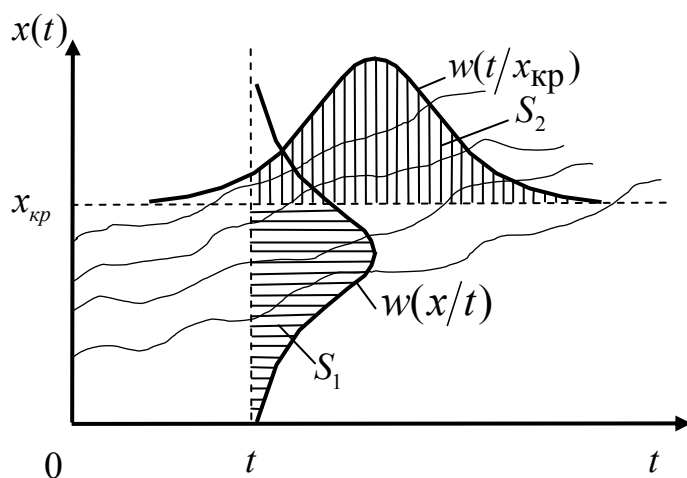


Рис.5.23. К вопросу о нахождении закона распределения времени достижения параметром критической границы

В вертикальном сечении по t имеем распределение параметра $w(x/t)$. В горизонтальном сечении по $x_{кр}$ имеем плотность распределения $w(t/x_{кр})$ случайного времени достижения параметром $x(t)$ критического уровня $x_{кр}$.

Из построений видно, что число реализаций, пересекающих границу $x_{кр}$ для моментов времени, больших t , равно числу реализаций в сечении t при $x < x_{кр}$.

Следовательно, площади S_1 и S_2 (см. рис.5.23) равны между собой. В свою очередь можно записать:

$$S_1 = \text{Вер} \{x(t) < x_{кр}\} = F(x_{кр}/t);$$

$$S_2 = 1 - \text{Вер} \{T < t/x_{кр}\} = 1 - F(t/x_{кр}),$$

где T — случайное время достижения параметром $x(t)$ критической границы $x_{кр}$;

$F(x_{кр}/t)$ — функция распределения параметра $x(t)$, подсчитанная для значения $x(t) = x_{кр}$ в сечении t ;

$F(t/x_{кр})$ — функция распределения времени достижения параметром $x(t)$ критического уровня $x_{кр}$, подсчитанная со значением t .

Из равенства $S_1 = S_2$ получим

$$F(x_{кр}/t) = 1 - F(t/x_{кр}).$$

Отсюда

$$F(t/x_{кр}) = 1 - F(x_{кр}/t).$$

Из последнего выражения видно, что нужно определить значение функции распределения $F(x/t)$ в точке $x(t)=x_{кр}$ для сечения t .

Будем считать, что случайные величины ξ и η , входящие в функцию (5.67), подчиняются нормальным законам. Тогда, согласно [7], сама функция $x(t)$ также будет подчиняться нормальному закону с параметрами

$$m_x = m_\xi + m_\eta \cdot t;$$

$$\sigma_x = \sqrt{\sigma_\xi^2 + \sigma_\eta^2 \cdot t^2},$$

где m , σ — знаки математического ожидания и среднего квадратического отклонения.

Выразим функцию распределения параметра $x(t)$ через табличную функцию стандартного нормального распределения $\Phi(\dots)$ (прил.1, табл.П1.1).

$$F(x_{кр}/t) = \Phi\left[\frac{x_{кр} - m_x}{\sigma_x}\right].$$

Функция распределения времени достижения критической границы:

$$F(t/x_{кр}) = 1 - F(x_{кр}/t) = 1 - \Phi\left(\frac{x_{кр} - m_x}{\sigma_x}\right).$$

Вероятность того, что за время t параметр не достигнет критического уровня $x_{кр}$ определится как

$$P(t) = 1 - F(t/x_{кр}) = \Phi\left(\frac{x_{кр} - m_x}{\sigma_x}\right).$$

Это выражение может быть использовано и в задачах оценки уровня параметрической надежности по параметру $x(t)$.

Пример 5.5. Реализация случайного процесса (сопротивления резистора R) аппроксимируется линейной функцией

$$R(t) = R_0 + ct,$$

где R_0, c — случайные величины, которые подчиняются нормальному закону с параметрами:

$$m_{R_0} = 100 \text{ Ом}; \sigma_{R_0} = 3,3 \text{ Ом}; m_c = 4 \cdot 10^{-4} \text{ Ом/ч}; \sigma_c = 1 \cdot 10^{-4} \text{ Ом/ч};$$

Требуется определить вероятность того, что за время $t=10000$ ч сопротивление резистора не достигнет критического уровня $R_{кр}=112 \text{ Ом}$.

Решение.

1. Определяем математическое ожидание m_R функции $R(t)$:

$$m_R = m_{R_0} + m_C \cdot t = 100 + 4 \cdot 10^{-4} \cdot 1000 = 104 \text{ Ом}$$

2. Определяем среднее квадратическое отклонение σ_R функции $R(t)$:

$$\sigma_R = \sqrt{\sigma_{R_0}^2 + \sigma_C^2 \cdot t^2} = \sqrt{3,3^2 + (1 \cdot 10^{-4})^2 \cdot 10000^2} \approx 3,5 \text{ Ом}$$

3. Вычисляем вероятность того, что сопротивление резистора за время $t = 1000$ ч не выйдет за пределы $R_{кр} = 112$ Ом.

$$P(t) = \Phi\left(\frac{R_{кр} - m_R}{\sigma_R}\right) = \Phi\left(\frac{112 - 104}{3,5}\right) = \Phi(2,29) \approx 0,987.$$

5.24. Пути обеспечения параметрической надежности РЭУ на этапе проектирования

Обеспечение параметрической надежности является важной частью общих мероприятий по обеспечению надежности при проектировании РЭУ.

При обеспечении параметрической надежности РЭУ особое место отводится оценке отклонений выходных параметров, обусловленных действием производственных погрешностей параметров комплектующих элементов РЭУ, старения и температуры. В зависимости от класса РЭУ первостепенное внимание может быть уделено и другим факторам среды — влажности, радиации и т.п.

При решении задач по обеспечению параметрической надежности РЭУ в большинстве случаев приходится решать задачи и по ее оценке. Для этого используют вероятность, с которой гарантируется отсутствие постепенных отказов. Расчет вероятности основан на анализе точности и стабильности выходных параметров РЭУ. При анализе точности выполняется учет влияния на выходные параметры производственных погрешностей первичных параметров, а при анализе стабильности — учет влияния времени, процессов старения и факторов окружающей среды (температуры, влажности и т.д.).

На практике возможны различные пути обеспечения параметрической надежности. Рассмотрим два из них.

1. На основе анализа точности и стабильности выходного параметра устанавливается эксплуатационный допуск при такой гарантированной вероятности его обеспечения, которая численно равна заданной вероятности отсутствия постепенных отказов.

Если полученное значение допуска отвечает служебному назначению РЭУ, то задача обеспечения параметрической надежности по данному выходному параметру решена. В противном случае необходимо пересмотреть требования к точности параметров элементов (уменьшить их погрешности) или же применить элементы с более высокой стабильностью параметров и затем повторить анализ точности и стабильности выходного параметра. И так до тех пор, пока значение эксплуатационного допуска не будет отвечать служебному назначению РЭУ.

2. Пусть в качестве исходного задано значение эксплуатационного допуска на j -й выходной параметр, установленное исходя из служебного назначения РЭУ.

Будем считать, что эксплуатационный допуск на j -й выходной параметр симметричен и задан значением половины поля допуска $\delta(\Delta y/y)_{\Sigma}$ суммарной относительной погрешности выходного параметра. Тогда задача обеспечения параметрической надежности РЭУ по j -му выходному параметру состоит в том, чтобы выбрать элементы с таким уровнем стабильности (временной, температурной и т.д.) и с такой производственной погрешностью, чтобы нахождение j -го параметра в пределах заданного допуска $\delta(\Delta y/y)_{\Sigma}$ за промежуток времени t_3 гарантировалось с вероятностью не ниже, чем значение $P_{\text{пар}}(t_3)$.

Решить поставленную задачу можно следующим образом. Выбрать типы элементов и по нормативно-техническим документам (ГОСТам, ОСТам, ТУ и т.п.) найти характеристики их стабильности: коэффициенты старения, температурные коэффициенты и т.п. Основываясь на этих характеристиках, рассчитать какой суммарный разброс выходного параметра вызовут действия старения в течение промежутка времени t_3 и эксплуатационных факторов заданного уровня. Предположим, что суммарный разброс характеризуется средним значением $M(\Delta y/y)_{\text{стаб}}$ и половиной поля рассеивания $\delta(\Delta y/y)_{\text{стаб}}$.

Сопоставляя значения $M(\Delta y/y)_{\text{стаб}}$ и $\delta(\Delta y/y)_{\text{стаб}}$ с заданным значением эксплуатационного допуска $\pm \delta(\Delta y/y)_{\Sigma}$ определяют, какая доля допуска (какой разброс) приходится на производственную погрешность выходного параметра. И, наконец, основываясь на рассчитанной производственной погрешности, например, величине половины поля допуска $\delta(\Delta y/y)_{\text{пр}}$, назначают допуски на первичные параметры. Если $\delta(\Delta y/y)_{\text{пр}}$ оказалась настолько малой, что не удастся выбрать разумные и экономически оправданные допуски на параметры элементов, то следует пересмотреть их типы, выбрав элементы с более стабильными параметрами или же, если это оправдано, предусмотреть меры защиты элементов от воздействия факторов окружающей среды.

5.25. Методы повышения надежности РЭУ

5.25.1. Понятие эксплуатационной надежности РЭУ

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

Надежность, которую РЭУ показывают в процессе эксплуатации, называют *эксплуатационной надежностью*. Опыт эксплуатации РЭУ показывает, что эксплуатационная надежность практически всегда ниже того уровня, который получается по результатам расчета при проектировании устройства. Это объясняется как явными ошибками проектирования и несовершенством технологии производства, так и низкой достоверностью справочных данных о надежности элементов.

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

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

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

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.

5.25.2. Общая характеристика методов повышения надежности РЭУ

Все методы повышения надежности 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 надежность, 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 $0,2 \dots 0,6$. Их снижение повышает надежность элементов, однако ведет, как правило, к увеличению массы, габаритов, стоимости устройства. Кроме того, чрезмерное уменьшение коэффициентов электрической нагрузки может вызвать нестабильную работу ряда элементов, например, полупроводниковых приборов.

2. Отбраковка потенциально ненадежных элементов в условиях производства РЭУ. Используют как тренировку (термотренировку, электротренировку, электротермотренировку), так и методы индивидуального прогнозирования надежности элементов.

3. Защита элементов РЭУ от воздействия факторов окружающей среды.

Особую группу методов составляет повышение надежности путем резервирования.

Подробное рассмотрение методов повышения надежности РЭУ является предметом учебной дисциплины "Инженерное обеспечение надежности РЭС" и в данном учебнике не приводится. Здесь рассматривается резервирование, его виды и методы оценки показателей безотказности устройств при наличии резервирования, а также дается теоретическое обоснование тренировки как метода снижения интенсивности отказов элементов.

При изучении методов повышения надежности элементов и РЭУ читатель может использовать работы [5, 6, 20, 27, 28].

5.26. Резервирование как метод повышения надежности РЭУ

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

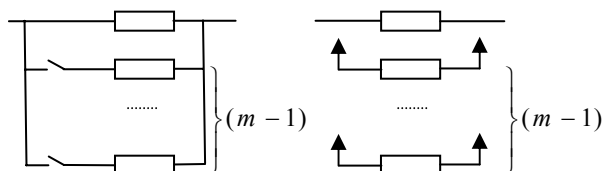


Рис.5.24. Схематическое изображение резервирования замещением:
 $(m-1)$ – количество резервных элементов

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 цепи, 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.5.24.

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

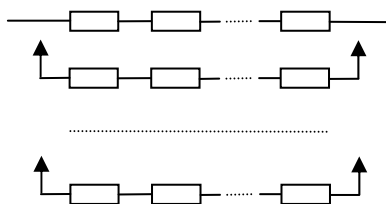


Рис.5.25. Общее резервирование

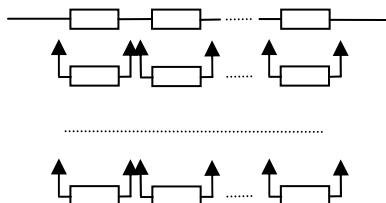


Рис.5.26. Раздельное (поэлементное) резервирование

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.5.25) и раздельное (поэлементное) резервирование (рис.5.26).

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

5.27 Характеристика постоянного резервирования

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

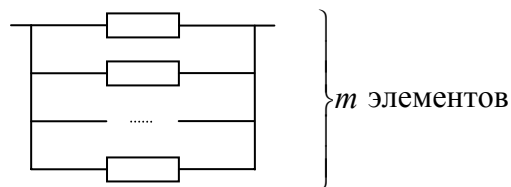


Рис.5.27. Параллельный способ соединения элементов резервируемого узла

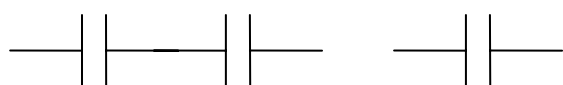


Рис.5.28. Последовательный способ соединения элементов резервируемого узла

1. Параллельный (рис.5.27).

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

2. Последовательный (рис.5.28).

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

3. Смешанный (рис.5.29).

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, полупроводящих, 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 надежности по сравнению с резервированием замещением;

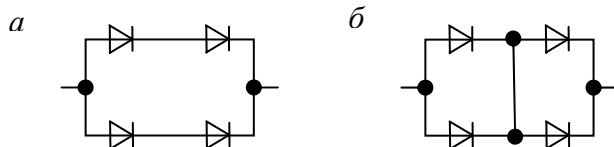


Рис.5.29. Примеры смешанного соединения элементов резервируемого узла:

а - последовательно-параллельная схема;
б - параллельно-последовательная схема

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

3) отказ резервируемого узла в целом при коротком 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.

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

5.28. Оценка показателей безотказности устройства при наличии постоянного резервирования

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

$$p + q_o + q_{кз} = 1, \quad (5.68)$$

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

Покажем прием анализа безотказности на примере параллельного способа соединения двух элементов резервируемого узла (рис.5.30).

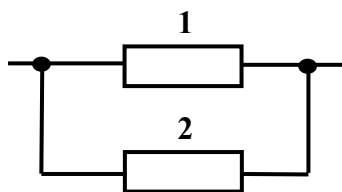


Рис.5.30. Параллельное соединение элементов

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

Рассмотрим состояния, благоприятствующие исправной работе этого резервируемого узла. Всего состояний резервируемого узла девять ($3^2=9$), так как элемент имеет три состояния, а всего элементов два (см. рис.5.30). Из девяти

состояний благоприятствующими безотказной работе узла в целом будут лишь три (табл.5.9).

Таблица 5.9

Состояние 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.5.9 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.

$$P_{1,2}^{\text{пар}}(t_3) = pp + pq_o + q_o p = p^2 + 2pq_o \quad (5.69)$$

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

$$P_{1,2,\dots}^{\text{пар}}(t_3) = \sum_{j=0}^{m-1} C_m^{m-j} p^{m-j} q_o^j \quad (5.70)$$

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

$$C_m^{m-j} = \frac{m!}{(m-j)!j!} \quad (5.71)$$

Следует знать, что

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

поэтому в формуле (5.70) величина C_m^{m-j} может быть заменена на величину C_m^j .

При использовании формулы (5.71) нужно помнить, что $0!=1$.

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

$$P_{1,2,\dots}^{\text{пар}}(t_3) = \sum_{j=0}^{m-1} C_m^{m-j} p^{m-j} q_{\text{кз}}^j \quad (5.72)$$

Нетрудно увидеть, что формула (5.72) получается из формулы (5.70) путём замены вероятности q_o на вероятность $q_{кз}$.

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

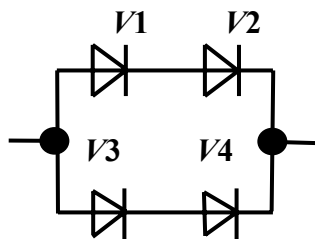


Рис.5.31. Смешанный способ соединения диодов резервируемого узла (последовательно-параллельная схема)

Покажем, как выполнять анализ безотказности на примере смешанного способа соединения (рис.5.31).

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

$$\begin{aligned} p(t_3) &= p = 0,8; \\ q_o(t_3) &= q_o = 0,1; \\ q_{кз}(t_3) &= q_{кз} = 0,1. \end{aligned}$$

Рассматривая схему соединения диодов (см.рис.5.31), можно увидеть, что две последовательные цепочки соединены между собой параллельно, отсюда и название схемы: последовательно-параллельная.

В литературе [23] описывается прием анализа, основанный на рассмотрении состояний резервируемого узла. Так, в данном примере узел будет иметь

$$3^4 = 81 \text{ состояние,}$$

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 [23]. 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 диод (рис.5.32), причем он будет иметь свои характеристики, а именно

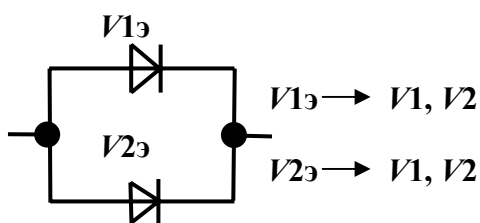


Рис.5.32. Свертка диодов последовательных цепочек в эквивалентный диод

$p_{э}$, $q_{oэ}$, $q_{кзэ}$.

Предположим, что показатели безотказности эквивалентного диода $p_{э}$, $q_{oэ}$, $q_{кзэ}$ каким-либо образом найдены. Тогда задача определения вероятности безотказной работы резервируемого узла в целом сводится к ранее рассмотренной задаче – параллельному соединению элементов резервируемого узла.

Применим изложенный подход к рассматриваемому примеру (см. рис.5.31).

Применяя формулу (5.69) 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 $q_{\text{оэ}}$ и $q_{\text{кзэ}}$. 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 (5.68).

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.5.31) определим, пользуясь рис.5.32 и формулой (5.70) или ее реализацией (5.69) для случая двух параллельно соединенных элементов.

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

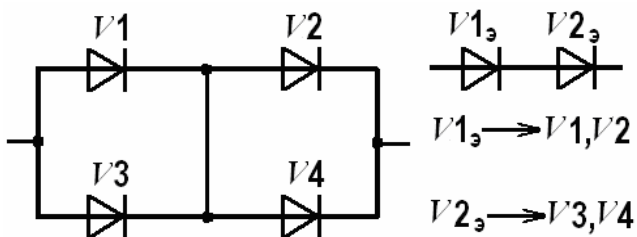


Рис.5.33. Параллельно-последовательная схема соединения элементов резервируемого узла и ее свертка

В случае соединения элементов по параллельно-последовательной схеме выполняется свертка в эквивалентный элемент цепочек из параллельно соединенных элементов (рис.5.33).

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.

5.29. 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, в том числе резервирования замещением, является краткость резерва [18], выражаемая несокращенной дробью и определяемая отношением

$$R = \frac{r}{n}, \quad (5.73)$$

где r – количество резервных элементов, способных замещать основные элементы данного типа; $r = m - n$ (см. рис.5.34);

n – количество основных элементов, резервируемых резервными элементами.

Примеры оценки кратности резерва понятны из рис.5.34.

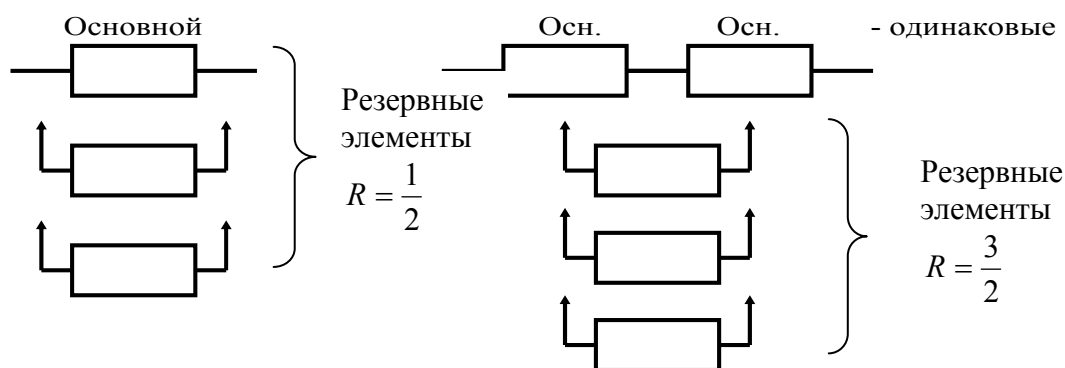


Рис.5.34. Примеры оценки кратности резерва

Из рис.5.34 видно, что дробь, описывающую кратность резерва, нельзя сокращать, так как будет потеряна информация о характеристике 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 трех режимов нагружения:

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.5.35,а);

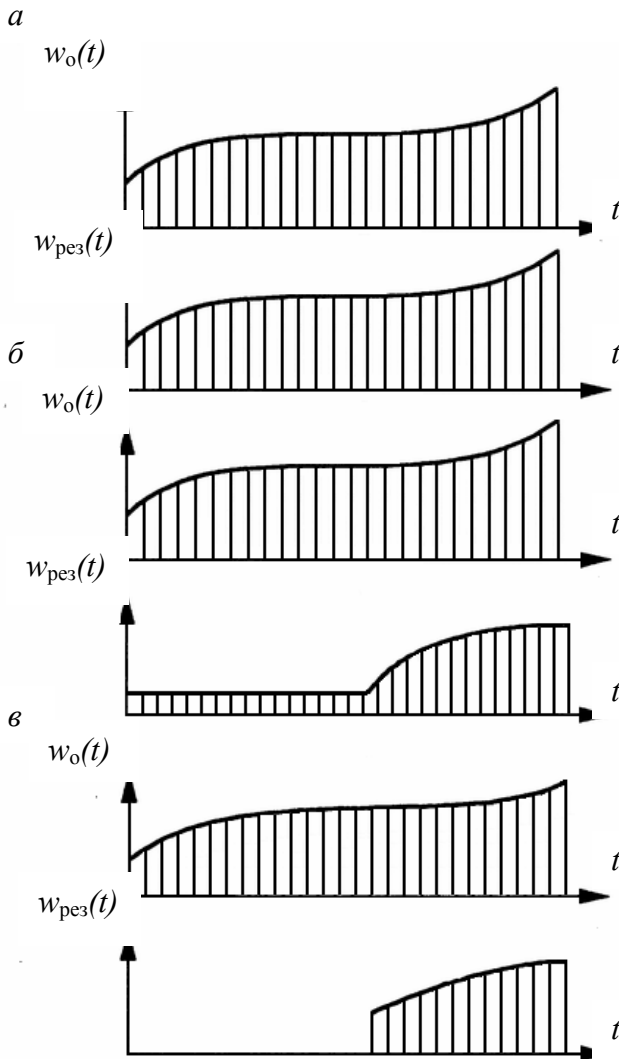


Рис.5.35.Плотность распределения времени безотказной работы резервируемой аппаратуры:
а - нагруженный резерв
б - облегченный резерв
в - ненагруженный резерв

б) в облегченном режиме. В этом случае говорят об облегченном резерве или “тёплом” 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.5.35,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.5.35,в).

Основные достоинства резервирования замещением:

1) большой выигрыш в надежности 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.

5.30. 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 приемы анализа безотказности устройств в случае нагруженного резерва, проиллюстрировав их на примере.

Пример 5.6 Пусть схема (модель) расчета надёжности имеет вид, показанный на рис.5.36.

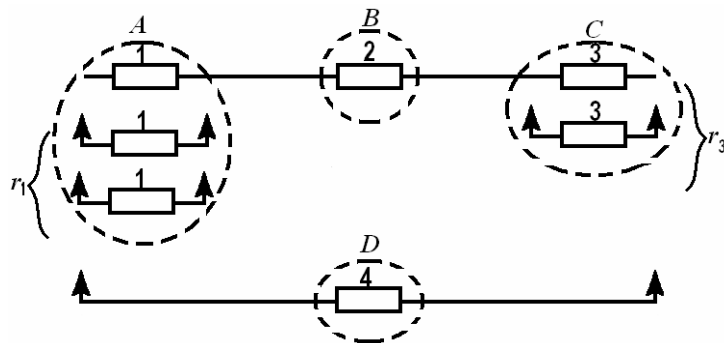


Рис.5.36. Схема расчёта надёжности

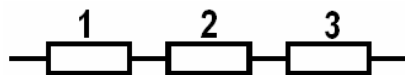


Рис.5.37. Структура элемента 4

Будем считать, что основной и резервные элементы одинаковы, а элемент 4 имеет минимальную функционально необходимую структуру, т.е. эквивалентен цепочке, показанной на рис.5.37.

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

$$p_1(t_3) = p_1 = 0,6; \quad p_2(t_3) = p_2 = 0,95; \quad p_3(t_3) = p_3 = 0,8.$$

Решение. Из рис.5.36 видно, что устройство состоит из узла A (представляет собой резервируемую структуру с кратностью резервирования два к одному), узла B (нерезервируемый элемент), узла C (резервируемая структура с кратностью резервирования один к одному) и узла D (резервный элемент для устройства в целом).

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

С использованием основного расчетного соотношения (5.34) 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 надежность 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:

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

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:

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

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

$$p_C = 1 - q_C = 1 - 0,04 = 0,96.$$

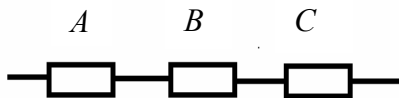


Рис.5.38. Соединение узлов A , B , C

Узлы A , B , C с точки зрения надежности соединены последовательно (рис.5.38).

Следовательно, используя основное расчетное соотношение, их общую вероятность безотказной работы можно определить как

$$p_{ABC} = p_A \cdot p_B \cdot p_C = 0,936 \cdot 0,95 \cdot 0,96 \approx 0,85.$$

5. Подсчитаем вероятность безотказной работы устройства в целом (с учетом узла D). Узел D резервирует узлы A , B , C , что схематически изображено на рис.5.39.

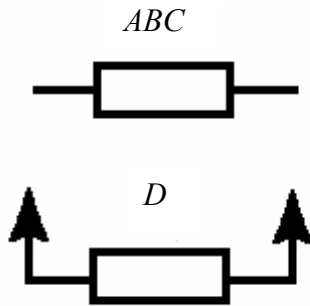


Рис.5.39. Соединение узлов ABC и D

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 0,45.

5.31. Анализ безотказности РЭУ при наличии резервирования замещением с облегченным режимом работы резервных элементов

Рассмотрим простейший случай. РЭУ состоит из узла, представляющего собой один основной элемент и один – резервный (рис.5.40).

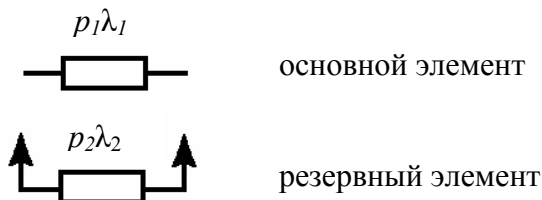


Рис.5.40. Схема резервируемого узла

Резервный элемент до момента отказа основного элемента находится в облегченных условиях (режиме). Плотность распределения времени до отказа основного и резервного элементов показана на рис.5.35,б. Предполагаем,

что переключающее устройство действует безотказно. Найдем вероятность безотказной работы за время t узла, показанного на рис.5.40. Введем обозначения:

- p_1 – вероятность безотказной работы за время t основного элемента;
- λ_1 – интенсивность отказов основного элемента;
- p_2 – вероятность безотказной работы резервного элемента за время t в рабочем режиме;
- λ_2 – интенсивность отказов резервного элемента в рабочем режиме;
- p_{20} – вероятность безотказной работы резервного элемента за время t в облегченном режиме;

λ_{20} – интенсивность отказов резервного элемента в облегченном режиме;

τ – момент включения резервного элемента вместо отказавшего основного (см. рис.5.35, б).

Нетрудно установить, что основной элемент имеет два состояния: работает безотказно либо отказал. Резервный элемент имеет четыре состояния: работает безотказно либо отказал в облегченном режиме, работает безотказно либо отказал в рабочем режиме, который может иметь место с момента τ . Значит общее число состояний рассматриваемого узла (см. рис.5.40) будет равно восьми. Из них благоприятными безотказной работе узла в целом будут лишь следующие три состояния:

1) оба элемента работоспособны на интервале времени t :

2) основной элемент работает безотказно на интервале времени от 0 до t , а резервный отказал в интервале времени от 0 до τ ;

3) основной элемент отказал на интервале времени от 0 до τ , а резервный элемент работает безотказно в интервале от 0 до τ (в облегченном режиме) и в интервале от τ до t (в рабочем режиме).

Тогда вероятность безотказной работы узла в целом за время t определяется как сумма вероятностей указанных трех состояний:

$$p_{\text{зам}(1...2)}^{(0)} = p(1) + p(2) + p(3). \quad (5.74)$$

Легко получить, что

$$\left. \begin{aligned} p(1) &= p_1 p_{20} \\ p(2) &= p_1 (1 - p_{20}) \end{aligned} \right\}. \quad (5.75)$$

При определении $p(3)$ существенную роль играет момент времени τ . Он случаен и может изменяться от 0 до t .

В работе [23] показано, что для любых значений τ

$$p(3) = \frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \lambda_{20} - \lambda_2} (p_2 - p_1 p_{20}). \quad (5.76)$$

Подставляя (5.75) и (5.76) в выражение (5.74), получим

$$p_{\text{зам}(1...2)}^{(0)}(t) = p_1 + \frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \lambda_{20} - \lambda_2} (p_2 - p_1 p_{20}). \quad (5.77)$$

В случае, когда основной и резервный элементы одинаковы, т.е. при

$$p_1 = p_2 = p \text{ и } \lambda_1 = \lambda_2 = \lambda$$

получим

$$p_{\text{зам}(1...2)}^{(0)}(t) = \frac{1}{\alpha} e^{-\lambda t} (1 + \alpha - e^{-\lambda_0 t}), \quad (5.78)$$

где $\alpha = \lambda_0 / \lambda$ – коэффициент загрузки элемента.

Формула (5.78) получена в предположении, что для элементов справедлив экспоненциальный закон надежности, т.е. когда

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

В случае, когда один элемент основной, а $m - 1$ резервные, формула для оценки вероятности безотказной работы узла может быть получена (при одинаковых элементах) [23] в виде

$$p_{\text{зам}(1...m)}^{(0)}(t) = \frac{\prod_{j=0}^{m-1} (1 + \alpha \cdot j)}{\alpha^{m-1} (m-1)!} \sum_{i=0}^{m-1} \frac{(-1)^i C_{m-1}^i}{1 + \alpha \cdot i} e^{-(1+\alpha i)\lambda t}. \quad (5.79)$$

5.32. Анализ безотказности РЭУ при наличии резервирования замещением с ненагруженным режимом работы резервных элементов

Для случая $t \leq \tau$ плотность распределения времени до отказа резервного элемента при ненагруженном режиме $w(t) = 0$ (см. рис.5.32, в). В этом режиме ($\lambda_{20} = 0$, $p_{20} = 1$, а $\alpha = 0$).

Выражения для определения вероятности безотказной работы за время t в случае одного основного элемента и $m-1$ резервных элементов, как показано в работе [23], имеют следующий вид:

$$p_{\text{зам}(1...2)}^{(\text{нн})}(t) = e^{-\lambda t} (1 + \lambda t); \quad (5.80)$$

$$p_{\text{зам}(1...m)}^{(\text{нн})}(t) \approx e^{-\lambda t} \sum_{i=0}^{m-1} \frac{(\lambda t)^i}{i!}. \quad (5.81)$$

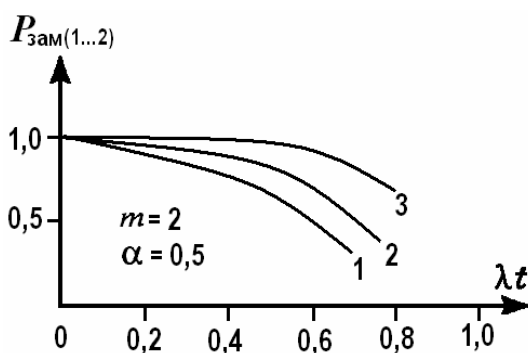


Рис.5.41. Влияние характера режима работы резервного элемента на вероятность безотказной работы узла при $m=2$, $\alpha=0,5$: 1 – нагруженный режим; 2 – облегченный режим; 3 – ненагруженный режим

На рис.5.41 показаны зависимости вероятности безотказной работы узла, состоящего из одного основного и одного резервного элементов, заменяемого способом замещения при различных режимах работы резервного элемента.

Из рис.5.41 видно, что наибольший выигрыш в надежности получается в ненагруженном режиме.

5.33. Теоретическое обоснование тренировки как метода снижения интенсивности отказов элементов

В общем случае возможны два основных направления повышения надёжности элементов:

1) устранение причин отказов при изготовлении элементов путем изучения, усовершенствования технологического процесса и повышения контроля. Для такого усовершенствования необходима замкнутая цепь обратной связи для передачи производственной информации.

2) выявление и удаление элементов с действительными и потенциальными отказами из готовой продукции до поставки ее потребителю.

Наиболее эффективным методом повышения надежности является устранение причин отказов путем усовершенствования технологии. Необходимо всеми силами добиваться более эффективной и оперативной производственной обратной связи. Но известно, что отказы возможны даже в хорошо освоенной продукции. По этой причине перед отправкой элементов заказчику может производиться тренировка, в процессе которой отказавшие элементы отбраковываются из массовой продукции. Ниже приводится теоретическое обоснование тренировки.

Тренировка – это такой метод отбраковки, при котором элементы заставляют работать в определенных условиях окружающей среды и электрической нагрузки, выбранных таким образом, чтобы в процессе работы вызвать отказ у дефектных элементов, не повреждая хороших. К дефектным элементам относятся те, которые могут отказать в течение предполагаемого времени работы элементов.

Перед тренировкой все элементы проверяются на соответствие техническим условиям (ТУ). Если они удовлетворяют требованиям ТУ, то их подвергают тренировке при заданных условиях нагрузки и затем производят повторную проверку соответствия требованиям ТУ. При этом все элементы, не удовлетворяющие требованиям ТУ, считаются отказавшими и удаляются из продукции. Оставшиеся элементы отправляются потребителю. Это позволит снабдить потребителя элементами, которые наверняка будут работать более длительное время.

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

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

$$w(t) = \rho \cdot \beta \cdot t^{\beta-1} e^{-\rho \cdot t^\beta}; \quad \rho > 0, \quad (5.82)$$

где ρ, β – параметры распределения; β называют коэффициентом формы.

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

$$\lambda(t) = \frac{w(t)}{p(t)}, \quad (5.83)$$

где $p(t)$ – вероятность безотказной работы элемента за время t .

Нетрудно убедиться, что в случае распределения Вейбулла

$$p(t) = \int_t^\infty w(t) dt = e^{-\rho \cdot t^\beta}. \quad (5.84)$$

Подставим выражения (5.82) и (5.84) в соотношение (5.83) получим

$$\lambda(t) = \rho \beta t^{\beta-1}. \quad (5.85)$$

На рис.5.42 показаны графики зависимости интенсивности отказов от времени при нескольких значениях вейбулловского параметра формы β . Графики построены с использованием выражения (5.85).

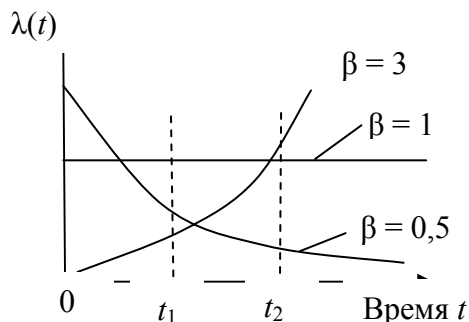


Рис.5.42. Зависимость интенсивности отказов от времени при разных значениях коэффициента формы β

Предположим, что тренировка длится до точки t_1 и наша цель – добиться минимальной средней интенсивности отказов λ в интервале от t_1 до t_2 . Дадим характеристику трем случаям, указанным на рис.5.42.

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

от нуля.

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

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

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

Известно [22], что при нормальном распределении времени до отказа интенсивность отказов возрастает со временем. Поэтому для таких элементов как элементы коммутации, механические элементы, функционирование которых сопровождается износом, тренировка не оправдана, ибо для них справедлив нормальный закон распределения времени до отказа.

Чем меньше параметр формы β , тем более эффективной будет тренировка, в течение любого данного отрезка времени и, следовательно, тем меньше будет средняя интенсивность отказов элементов, поставляемых потребителю.

На рис.5.43 приведена, зависимость эффективности тренировки от параметра формы β при разной длительности тренировки. Под эффективностью тренировки понимают отношение количества отказов, возникших при тренировке, к полному числу отказов при эксплуатации, выраженное в процентах.

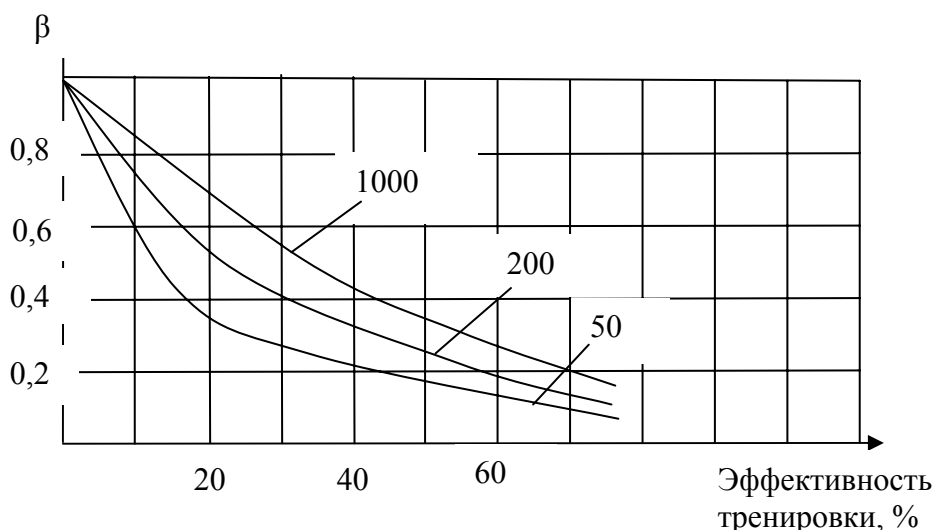


Рис.5.43. Эффективность тренировки в зависимости от параметра формы β (для каждой кривой указана продолжительность тренировки в ч)

Предполагается, что время работы равно 10000 ч, а условия тренировки близки к рабочим. Кривые графиков легко получить из графика распределений Вейбулла на вейбулловской вероятностной бумаге.

Зависимости, подобные приведенным на рис.5.43, можно построить при любых требованиях, предъявляемым к элементам. По ним можно определить, нужна ли тренировка и, если нужна, какая должна быть её продолжительность.