

Раздел 1. ОСНОВЫ ТЕОРИИ НАДЁЖНОСТИ

СОДЕРЖАНИЕ

1.1. Причины обострения проблемы надежности РЭУ.....	8
1.2. Основные понятия и определения теории надежности.....	8
1.3. Понятие отказа. Классификация отказов.....	10
1.4. Схемы соединения элементов в устройстве с точки зрения надежности.....	11
1.5. Причины отказов РЭУ.....	12
1.6. Модели законов распределения времени до отказа.....	13
1.7. Показатели надежности РЭУ и их элементов	15
1.8. Вероятность безотказной работы и вероятность отказа.....	18
1.9. Интенсивность отказов.....	20
1.10. Нарботка на отказ (средняя наработка на отказ)	22
1.11. Среднее время безотказной работы.....	23
1.12. Параметр потока отказов.....	24
1.13. Среднее время восстановления и вероятность восстановления.....	24
1.14. Эксплуатационные коэффициенты надежности.....	25
1.15. Показатели долговечности.....	27

Раздел 1. ОСНОВЫ ТЕОРИИ НАДЁЖНОСТИ

1.1. Причины обострения проблемы надёжности РЭУ

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

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

1.2. Основные понятия и определения теории надёжности

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

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

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

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

Нередко под надёжностью в узком смысле слова понимают безотказность изделия.

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

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

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

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

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

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

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

1.3. Понятие отказа. Классификация отказов

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

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

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

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

Таблица 1.1

Классификация отказов РЭУ и их элементов

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

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

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

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

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

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

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

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

Независимым называют отказ, не обусловленный другими отказами.

Зависимым называют отказ, обусловленный другими отказами.

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

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

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

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

1.4. Схема соединения элементов в устройстве с точки зрения надёжности

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

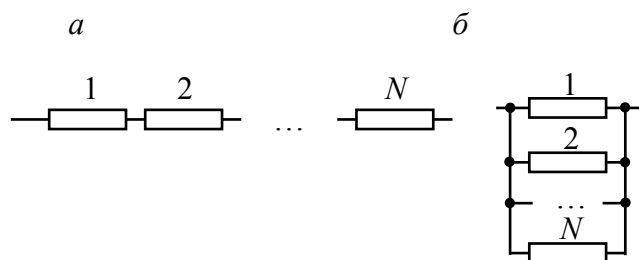


Рис.1.1. Схемы (модели) соединения элементов в устройстве с точки

зрения надёжности:

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

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

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

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

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

1.5. Причины отказов РЭУ

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

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

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

Таблица 1.2

Распределение отказов в зависимости от ошибок проектирования

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

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

Таблица 1.3

Распределение отказов в зависимости от ошибок производства

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

1.6. Модели законов распределения времени до отказа

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

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

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

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

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

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

где λ – параметр модели (распределения).

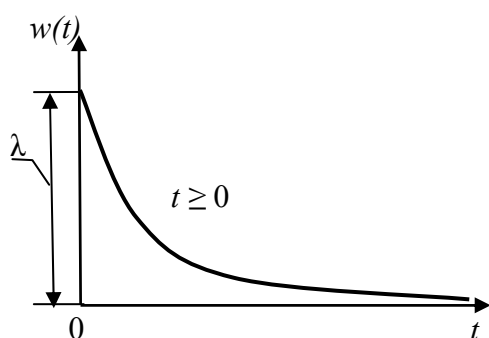


Рис. 1.2 Экспоненциальное распределение времени до отказа

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

Для модели Вейбулла плотность распределения времени до отказа

описывается выражением

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

где ρ , β – параметры модели (распределения).

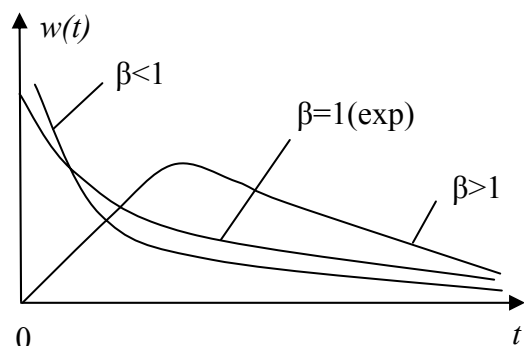


Рис.1.3. Распределение времени до отказа по закону Вейбулла

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

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

пределению.

Для нормальной модели плотность распределения времени до отказа описывается выражением

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

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

Здесь t_{cp} – среднее время безотказной работы;

σ_t – среднее квадратическое отклонение времени безотказной работы.

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

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

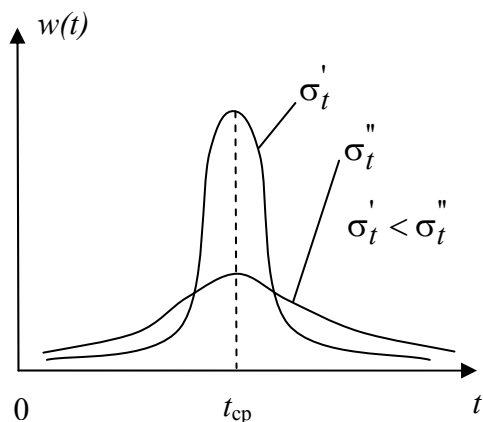


Рис.1.4. Распределение времени до отказа по нормальному закону

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

Проводя испытания элементов или устройств на надёжность 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.1.5) и попытаться восстановить вид функции $w(t)$.

Величины w_i^* определяют по формуле

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

где N – общее число испытываемых изделий;

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

Δt_i – ширина i -го временного интервала.

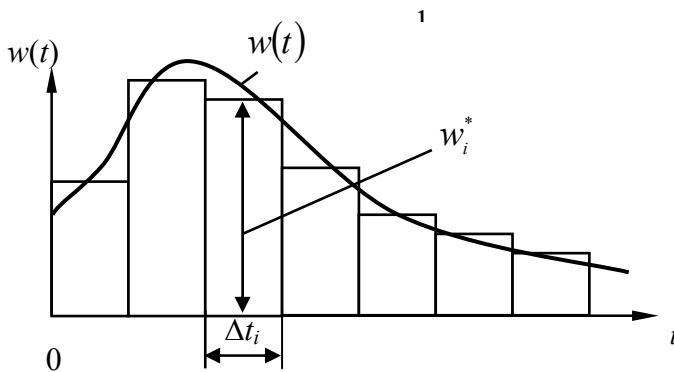


Рис.1.5. Гистограмма распределения времени до отказа

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

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

1.7. Показатели надёжности РЭУ и их элементов

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

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

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

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

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

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

интенсивность отказов λ ;

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

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

параметр потока отказов μ ;

гамма-процентная наработка до отказа T_γ .

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

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

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

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

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

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

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

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

Далее показатели этой группы также будут рассмотрены подробно.

Третья группа – показатели долговечности. К ним относятся:

Средний ресурс (математическое ожидание ресурса);

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

гамма-процентный срок службы.

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

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

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

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

гамма-процентный срок сохраняемости.

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

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

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

коэффициент готовности;
коэффициент технического использования;
коэффициент простоя.

Подробно эти коэффициенты рассматриваются в разделе 5.14.

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

1.8. Вероятность безотказной работы и вероятность отказа

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

Под вероятностью безотказной работы изделия за время t_3 понимают вероятность вида

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

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

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

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

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

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

С другой стороны, вероятность отказа можно представить как

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

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

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

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

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

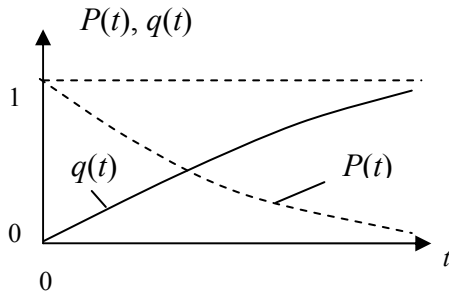


Рис.1.6. Графики функций $P(t)$ и $q(t)$

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

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

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

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

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

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

а вероятность отказа за время t_3

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

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

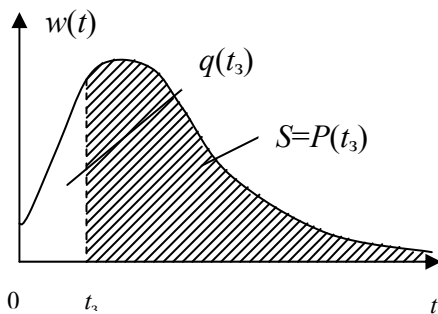


Рис.1.7. К определению вероятности безотказной работы и вероятности отказа

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

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

с использованием выражения (1.9) можно получить

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

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

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

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

где N — количество испытываемых изделий;

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

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

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

1.9. Интенсивность отказов

Под *интенсивностью отказов элементов* понимают величину, численно равную

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

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

Δt_i — ширина i -го временного интервала;

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

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

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

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

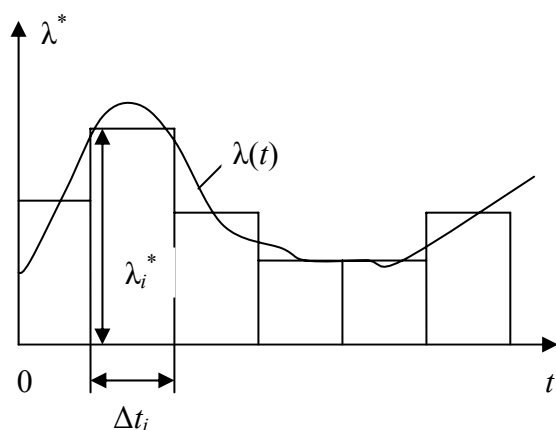


Рис.1.8. Восстановление вида функции $\lambda(t)$

пользуясь выражением

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

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

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

Интенсивность отказов устройства можно определить,

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

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

n – число возникших отказов устройства за время работы Δt .

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

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

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

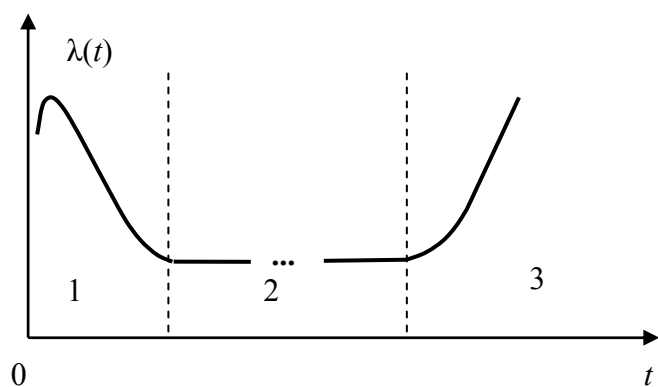


Рис.1.9.Типичный вид λ -характеристики РЭУ

На λ -характеристике можно четко выделить три области.

1. *Период приработки.*

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

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

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

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

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

1.10. Нарботка на отказ (средняя наработка на отказ)

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

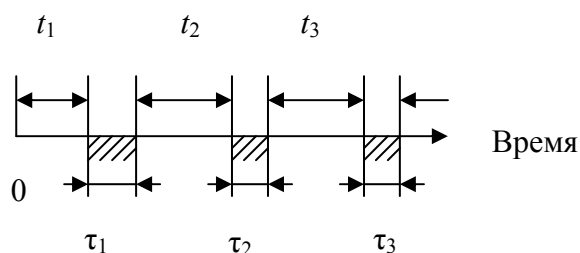


Рис.1.10. Процесс функционирования РЭУ: t_1, t_2, t_3 – интервалы безотказной работы РЭУ; τ_1, τ_2, τ_3 – интервалы по устранению отказов

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

Тогда под наработкой на отказ понимают величину, определяемую как

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

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

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

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

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

где M — количество экземпляров;

T_j — суммарное время безотказной работы j -го экземпляра;

m_j — количество отказов j -го экземпляра.

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

1.11. Среднее время безотказной работы

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Доказательство сформулированного вывода таково.

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

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

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

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

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

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

1.12. Параметр потока отказов

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

Параметр потока отказов μ для момента времени t определяют по формуле

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

где Δt — малый отрезок времени работы устройства;

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

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

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

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

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

1.13. Среднее время восстановления и вероятность восстановления

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

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

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

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

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

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

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

где T — случайное время восстановления изделия.

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

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

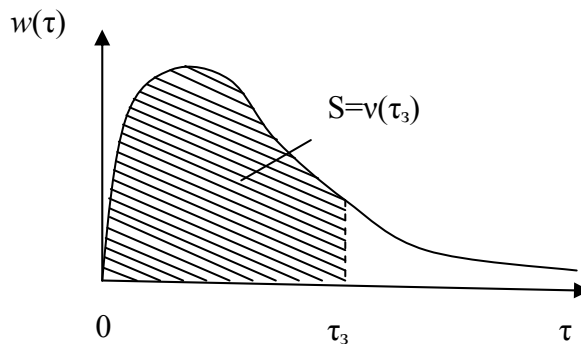


Рис. 1.11. К вопросу об определении величины $v(\tau_3)$

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

1.14. Эксплуатационные коэффициенты надёжности

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

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

Количественно коэффициент готовности можно подсчитать по формуле

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

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

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

m – количество отказов за рассматриваемый период.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Коэффициент простоя $K_{п}$ 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:

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

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

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

$$K_{и} = 1 - K_{п}.$$

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 $K_{р}$ связан с коэффициентом готовности $K_{г}$ выражением

$$K_{р} = 1 - K_{г}.$$

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

1.15. Показатели долговечности

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

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

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

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

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

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

Таблица 1.4

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

Поясним смысл некоторых показателей примерами.

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

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

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

Под понятием **назначенный ресурс (срок службы)** понимают такое значение ресурса (срока службы), при достижении которого

изделие снимается с эксплуатации независимо от его технического состояния. Эти показатели обычно используют для ответственных устройств, например электронных устройств военной техники.

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