

Министерство образования и науки России
Севастопольский государственный университет

Конспект тезисов лекций
профессора В.В. Севрикова
по курсу:

"Надёжность средств техносферной безопасности"

Севастополь
2016

СОДЕРЖАНИЕ

1. ОСНОВНЫЕ ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ.....	4
2. ОТКАЗЫ ТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ.....	6
2.1. Виды энергии, приводящие к отказам.....	6
2.2. Классификация по видам отказов.....	6
3. ПОКАЗАТЕЛИ НАДЁЖНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ.....	7
3.1. Общая характеристика показателей надёжности.....	7
3.2. Показатели надёжности технических объектов по свойству безотказности.....	9
3.3. Показатели надёжности по свойству долговечности.....	13
3.4. Показатели надёжности по свойству ремонтпригодности.....	15
3.5. Показатели надёжности по свойству сохраняемости.....	16
3.6. Комплексные показатели надёжности.....	16
3.7. Периоды жизненного цикла изделия.....	18
4. ОСНОВНЫЕ ЗАКОНЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СЛУЧАЙНЫХ ВЕЛИЧИН.....	19
5. РАСЧЁТ НАДЁЖНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ.....	21
5.1. Расчёт надёжности невосстанавливаемых и нерезервируемых систем.....	21
5.2. Невосстанавливаемые системы с постоянным нагруженным резервом.....	22
5.3. Структурное резервирование. Схемы резервирования.....	23
5.4. Схемы резервирования.....	25
6. РАСЧЁТ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЁЖНОСТИ НЕВОССТАНАВЛИВАЕМЫХ РЕЗЕРВИРОВАННЫХ СИСТЕМ.....	28
6.1. Расчёт показателей надёжности при последовательном соединении элементов в схеме.....	28
6.2. Расчёт показателей надёжности при параллельном соединении элементов в схеме.....	29
6.3. Расчёт показателей надёжности при комбинированном соединении элементов схем.....	31
6.4. Сложные расчётные схемы надёжности.....	31
7. ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЁЖНОСТИ ВОССТАНАВЛИВАЕМЫХ НЕРЕЗЕРВИРОВАННЫХ СИСТЕМ.....	32
7.1. Потоки отказов и восстановлений работоспособности систем.....	32
7.2. Марковский случайный процесс.....	33
7.3. Типовые графы состояний функционирования системы.....	34
8. МАТЕМАТИЧЕСКИЙ АППАРАТ ГРАФОВ СОСТОЯНИЯ СИСТЕМ.....	36
9. НАДЁЖНОСТЬ СИСТЕМЫ БЕЗОПАСНОСТИ.....	39
9.1. Особенности надёжности систем безопасности.....	39
9.2. Особенности функционирования систем безопасности. Структурно- функциональная надёжность.....	40
9.3. Общий подход к оценке параметро-точностной надёжности.....	43
9.4. Оценка эксплуатационно-прочностной составляющей надёжности.....	44
10. ПРОФИЛАКТИЧЕСКОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ.....	45
10.1. Регламентное профобслуживание.....	45
10.2. Календарное обслуживание.....	46
10.3. Смешанное обслуживание.....	46

11. НАЗНАЧЕНИЕ ТРЕБОВАНИЙ ПО НАДЁЖНОСТИ. ВЫБОР ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЁЖНОСТИ.....	47
11.1. Назначение требований.....	47
11.2. Выбор номенклатуры используемых показателей надёжности.....	48
11.3. Критичность отказов.....	50
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	51

Лекция 1. Введение

1. ОСНОВНЫЕ ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Данная дисциплина состоит из двух составляющих:

1. Основы классической теории надёжности.
2. Надёжность средств экологической безопасности.

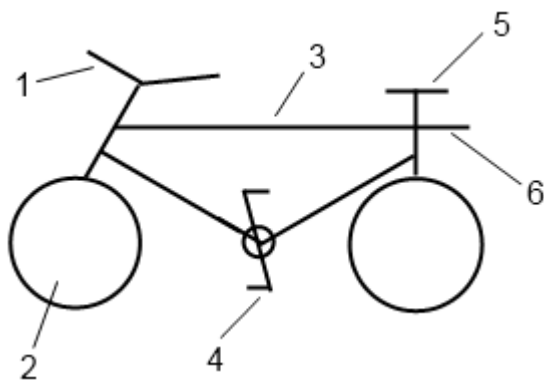
Надёжность — это частное свойство безопасности и эффективности.

Надёжность — это необходимое, но недостаточное условие безопасности, оно является важнейшей составляющей качества продукции.

Важнейшим в любой науке является также системный подход, т.е. методология научного познания, которая заключается в том, что любые объекты (технические, биологические, экономические и др.) рассматриваются как системы.

Система — это совокупность взаимосвязанных и взаимодействующих элементов, которые в зависимости от цели исследования могут рассматриваться как самостоятельные системы. Понятие элемента в надёжности различается с понятием в механике (машино-приборостроении).

Пример.



Система - велосипед

Элементы системы:

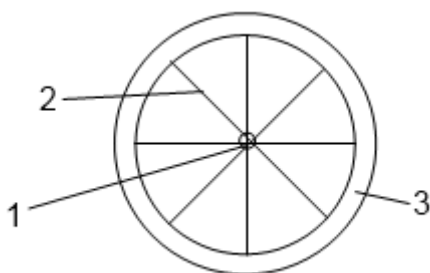
- 1 – руль;
- 2 – колесо;
- 3 – рама;
- 4 – педаль;
- 5 – сидение;
- 6 – багажник.

В основе оценки надёжности системы лежит её декомпозиция.

Декомпозиция — это разбиение системы на элементы.

Рассмотрим отдельный элемент как систему:

Система колесо



Элементы системы:

- 1 – втулка колеса;
- 2 – спица колеса;
- 3 – покрышка колеса.

В механике — это детали, которые имеют свои элементы.

Основными нормативными документами по вопросам надёжности являются межгосударственные ГОСТы:

- ГОСТ 27.001 – 95;
- ГОСТ 27.002 – 89;
- ГОСТ 27.003 – 90;
- ГОСТ 27.301 – 95;
- ГОСТ 27.310 – 95.

ГОСТ 27.001 – 95 "Система стандартов. Надёжность в технике. Основные положения".

ГОСТ 27.002 – 89 "Система стандартов. Надёжность в технике. Основные понятия, термины и определения".

ГОСТ 27.003 – 90 "Система стандартов. Надёжность в технике. Задание показателей надёжности".

ГОСТ 27.310 – 95 "Надёжность в технике. Анализ видов, последствий и критичности отказов".

ГОСТ 27.301 – 95 "Надёжность в технике. Расчёт надёжности. Основные положения".

Надёжность — это свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность объекта выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях эксплуатации, в том числе технического обслуживания, ремонта, а также хранения и транспортирования.

Составляющие надёжности (её свойства):

1. Безотказность;
2. Ремонтпригодность;
3. Долговечность;
4. Сохраняемость.

Безотказность — свойство объекта непрерывно сохранять во времени работоспособное состояние. Наиболее общим в теории надёжности является понятие технического объекта или изделия (элемент, деталь, узел).

Ремонтпригодность — свойство объекта, заключается в том, что объект приспособлен к предупреждению или обнаружению причин отказов, а также к проведению восстановления и техобслуживания (в том числе и ремонта). Эти два свойства хорошо просматриваются на примере телевизора.

Долговечность — свойство технического объекта сохранять работоспособность до перехода объекта в предельное состояние. Для технических объектов одноразового пользования (электрическая лампочка, диод и др.) свойство долговечность совпадает с безотказностью.

Предельное состояние — это состояние технического объекта, при котором его дальнейшее использование невозможно или нецелесообразно (по ресурсу, безопасности, эффективности и др.).

Сохраняемость — свойство технического объекта сохранять значения показателей безотказности, ремонтпригодности и долговечности в процессе хранения или (и) транспортирования.

Надёжность объекта (изделия) зависят так же от правильной его эксплуатации.

Лекция 2

2. ОТКАЗЫ ТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ

2.1 Виды энергии, приводящие к отказам

1. *Механическая энергия* возникает в результате трения механических узлов объекта, вызывающего напряжения, приводящие к отказам.

2. *Тепловая энергия.* В результате работы транзисторов, микросхем происходит нагрев, и если не обеспечить надёжный теплоотвод, то повышение температуры приводит к расплавлению контактов, а, следовательно, к отказу. Для охлаждения применяются специальные вентиляторы, большие радиаторы, забирающие своей поверхностью тепло.

3. *Химическая энергия* вызвана наличием в атмосфере кислот, щелочей или токсичной пыли. В результате эксплуатации оборудование подвергается коррозии, пробоям изоляции, а следовательно и к его отказам.

4. *Электромагнитная энергия* (излучение от компьютера, сотового телефона и др.) приводит к сбоям и отказам оборудования.

5. *Энергия виброакустического характера* (проверка оборудования вибрацией на наличие резонанса).

6. *Энергия ионизирующих излучений* (возникает при ядерном взрыве, работе ядерных реакторов) вызывает отказ в работе электронных систем.

2.2 Классификация по видам отказов

С точки зрения надёжности, *отказ* — случайное событие, которое заключается в том, что технический объект переходит из работоспособного состояния в неработоспособное. Объект может находиться в различных состояниях.

Работоспособное состояние — характеризуется тем, что объект выполняет все заданные функции и сохраняет все параметры, необходимые для выполнения поставленной задачи в заданных пределах.

Повреждение — случайное событие, которое заключается в том, что объект переходит из исправного в неисправное состояние.

Исправное состояние — состояние объекта, при котором все его параметры, характеристики и т.п. полностью соответствуют требованиям технической документации на этот объект.

В предельное состояние объект может переходить как из исправного, так и из работоспособного состояния.

Отказы бывают стандартные и дополнительные нестандартные.

1. *Внезапный отказ* — отказ, характеризующийся резким, скачкообразным изменением одного или нескольких параметров объекта (внезапное отключение телевизора, внезапный прорыв крана с водой).

2. *Постепенный отказ* — отказ, характеризующийся постепенным изменением и выходом за допустимые пределы одного или нескольких параметров технического объекта.

3. *Ресурсный отказ* — отказ, в результате которого объект достигает предельного состояния (этот отказ характеризует долговечность объекта). Ресурс — это наработка до момента перехода его в предельное состояние.

4. *Зависимый отказ* — обуславливается другими отказами в данном техническом объекте.

5. *Независимый отказ* — не обусловленный другими отказами.

Сбой — разновидность отказов, который представляет собой самоустраняющийся отказ.

6. *Скрытый отказ* — не обнаруживается визуально или не обнаруживается штатными методами и средствами контроля (диагностирования), а также не обнаруживаемый при проведении технического обслуживания или специальными методами диагностирования. Этот отказ характерен для радиоэлектронной и др. аппаратуры.

7. *Конструктивный отказ* — возникает по причине несовершенства конструкций технического объекта или по причине нарушения правил и норм проектирования и конструирования.

8. *Производственный отказ* — отказ технического объекта, обусловленный несовершенством технологии изготовления или обусловленный нарушением установленного процесса ремонта объекта.

9. *Эксплуатационный отказ* — отказ технического объекта, обусловленный нарушением установленных правил и норм эксплуатации объекта.

10. *Явный отказ* — отказ технического объекта, который обнаруживается визуально или штатными методами и средствами контроля и диагностирования.

11. *Перебегающий отказ* — это многократно возникающий сбой.

Часто в научной литературе встречаются дополнительные (нестандартные) виды отказов:

1. *Параметрический отказ* — отказ технического объекта, который обусловлен выходом за допустимые пределы одного или одновременно нескольких параметров технического объекта.

2. *Функциональный отказ* — отказ, обусловленный нарушением выполнения одной или нескольких основных функций объекта.

3. Структурный отказ — обусловлен ошибками при проектировании объекта, т.е. несовершенством схемных решений, и другие отказы.

Лекция 3

3. ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

3.1 Общая характеристика показателей надёжности

Для каждой из составляющих надёжности имеются ее количественные показатели. Имеются единичные и комплексные показатели. *Единичный*

характеризует одну составляющую (одно свойство) надёжности, например, вероятность безотказности $P(\tau)$. *Комплексный показатель* надёжности характеризует две или более составляющих надёжности, например, коэффициент готовности K_g .

Составляющих или свойств надёжности четыре:

- безотказность;
- ремонтпригодность;
- долговечность;
- сохраняемость.

Технические объекты (изделия) по восстановлению работоспособности разделяются на невозстанавливаемые и восстанавливаемые.

Восстановление — это процесс, который заключается в том, что объект переходит из состояния отказа в работоспособное или исправное состояние.

Невосстанавливаемые объекты — одноразового действия или использования, например, электрическая лампочка, кинескоп телевизора.

Восстанавливаемые — это объекты многократного пользования, например, прибор.

Наработка — это время работы технического объекта (в часах). Для некоторых объектов наработка может измеряться числом циклов или километрами (для автомобилей).

Наработка до отказа — характеристика для невозстанавливаемых объектов. Это время, число циклов или количество километров до отказа (рис. 1).

Наработка на отказ — характеристика восстанавливаемых объектов. Это среднее время работы изделия на отказ (рис. 2).

Невосстанавливаемый объект

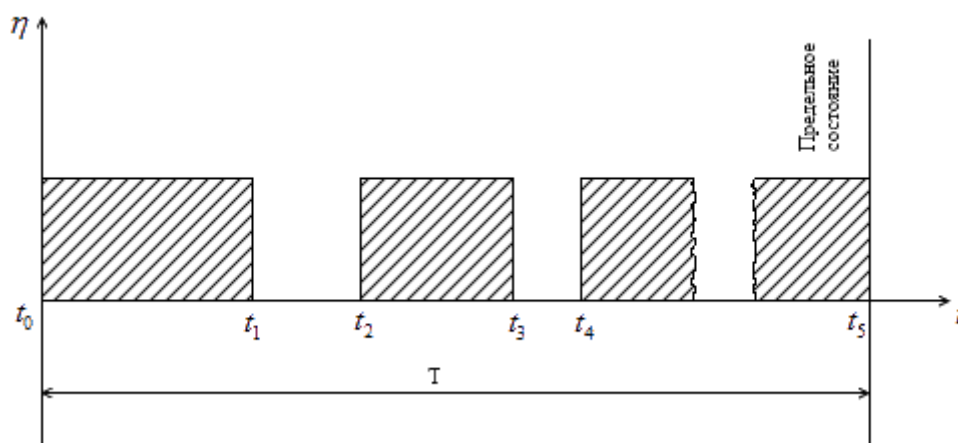


Рисунок 1 – Нарработка до отказа

t_0 — начало эксплуатации объекта;

t_1 — момент планового выключения объекта;

$t_1 \dots t_2$ — неэксплуатационный период;

t_2 — начало следующей эксплуатации;

t_3 — неплановое отключение объекта, например, отключение электроэнергии (лампочка в квартире не горит);

t_5 — отказ объекта (лампочка сгорела).

Общее время работы невосстанавливаемого объекта (без учёта его простоя):
 $T = [t_1 + (t_3 - t_2) + (t_5 - t_4)]$ — это чисто случайная величина.

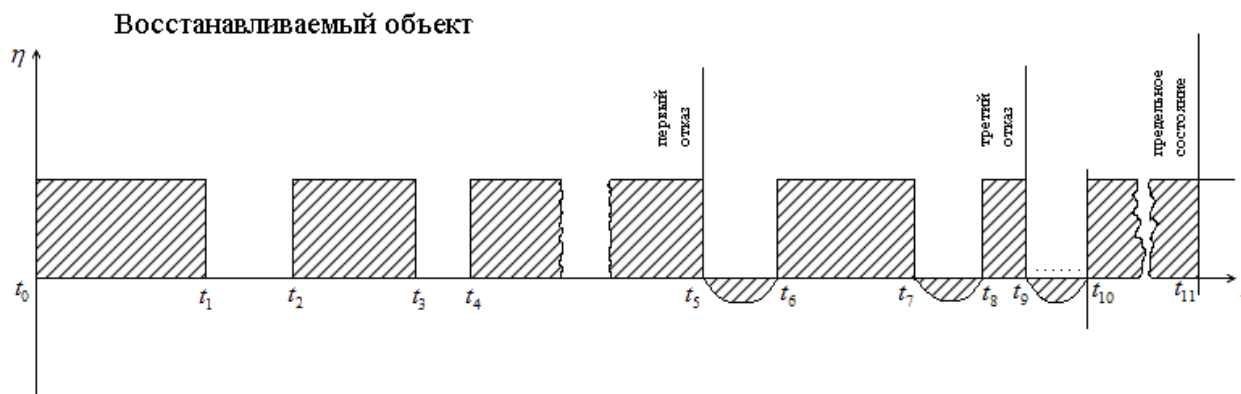


Рисунок 2 – Нарботка на отказ

$t_5 - t_6$ — процесс восстановления;
 $t_6 - t_7$ — нормальное функционирование;
 t_7 — второй отказ и т.д.

Нарботка на отказ $T_o = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i$, где n — число отказов; t_i — чистое время работы между отказами.

3.2 Показатели надёжности технических объектов по свойству безотказности

Показателями безотказности согласно ГОСТ 27.002-89 являются:

1. Вероятность безотказной работы $P(t)$;
2. Гамма-процентная наработка до отказа $F(t_\gamma)$ или $P(t_\gamma)$;
3. Средняя наработка до отказа T_1 ;
4. Интенсивность отказов $\lambda(t)$;
5. Параметр потока отказов $\mu(t)$;
6. Средний параметр потока отказов $\bar{\mu}(t)$;
7. Средняя наработка на отказ T .

Эти показатели относятся к единичным показателям надёжности.

1. *Вероятность безопасности работы $P(t)$* — это вероятность того, что в течение заданной наработки отказ объекта не возникает,

$P(t) = P\{\tau > t\}$ — вероятностное выражение показателя $P(t)$.

Вероятность безотказной работы за время t есть вероятность того, что заданное время t не будет превышать наработку до первого отказа τ .

Здесь τ — наработка до первого отказа;

t — заданный интервал времени работы объекта от 0 до t часов.

Наглядность понимания показателя $P(t)$ отображена на рисунке 3.

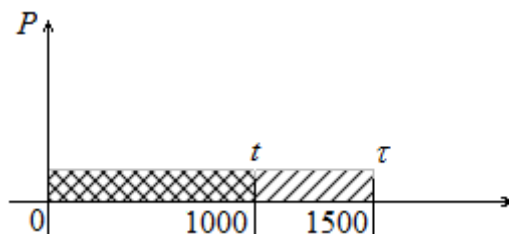


Рисунок 3 – Графическое отображение $P(t)$

При статистическом определении $P(t)$ по нескольким испытываемым объектам:

$$P(t) = \frac{N_1}{N},$$

N – число объектов, поставленных на испытание;

N_1 – число объектов, которое находится в работоспособном состоянии к моменту времени t .

При числе испытываемых изделий $N=10$ шт и одном из них отказавшем $P(t) = \frac{9}{10} = 0,9$.

Пример: $P(1000)$ — вероятность безотказной работы за 1000 часов работы при наработке до 1-го отказа $\tau = 1500$ ч.

Вероятность отказа $Q(t)$ — это вероятность того, что в течение заданного времени t произойдет хотя бы один отказ. Форма записи

$Q(t) = P\{\tau \leq t\}$ — вероятность того, что заданное время t превышает наработку до отказа τ . Поскольку $P(t) + Q(t) = 1$, то

$$Q(t) = 1 - P(t) \text{ при } P=0 \dots 1 \text{ и } Q=1 \dots 0.$$

Чем дольше работает объект, тем больше вероятность отказа.

Статистическое определение вероятности отказа

$$Q(t) = \frac{n(t)}{N}, \text{ где}$$

N – число объектов, поставленных на испытание;

$n(t)$ – число объектов, отказавших в момент времени t .

2. Гамма-процентная наработка до отказа $\gamma, \%$ — наработка, в течение которой отказ объекта не возникает с вероятностью γ :

$$F(t_\gamma) = 1 - \frac{\gamma}{100} \text{ — это выражение для вывода любых } \gamma\% \text{ - ных показателей.}$$

Аналитическое выражение для $\gamma\%$ - ной наработки до отказа:

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

Например, для заданной доверительной вероятности $\gamma = 95\%$ $P(t_j = 0,95) = 95/100 = 0,95$.

$F(t_\gamma)$ – функция распределения наработки до отказа или др. случайной величины, например: ресурса, срока службы и т.д.

Лекция 4 (продолжение)

Показатели надёжности по свойству безотказности

3. *Средняя наработка до отказа* T_1 — это математическое ожидание соответствующей случайной величины наработки до отказа.

Аналитическое выражение:

$$T_1 = \int_0^{\infty} [1 - F(t)] dt = \int_0^{\infty} P(t) dt .$$

Статистическое определение \bar{T}_1 ,

$\bar{T}_1 = \frac{1}{N} \sum_{\gamma=1}^N \tau_{\gamma}$ — это отношение суммы наработок объектов, поставленных на

испытание до первого их отказа, к числу этих объектов N . Графическое представление показано на рисунке 4.

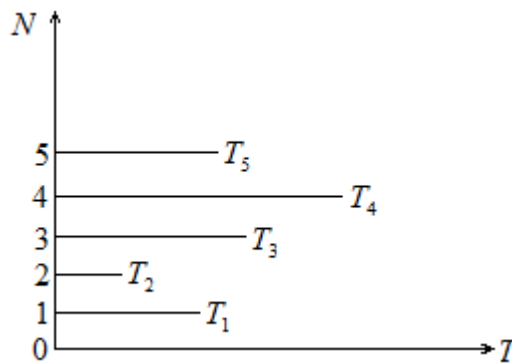


Рисунок 4 – Изображение времени наработки до отказа

4. *Средняя наработка на отказ* T — это отношение суммарной наработки восстанавливаемого объекта к математическому ожиданию числа его отказов в течение наработки.

Вероятностное выражение $T = \frac{t}{M[r(t)]}$,

где t – суммарная наработка восстанавливаемого объекта;

M – математическое ожидание;

r – число отказов, наступивших в течении этой наработки t .

Статистическая оценка $\bar{T} = \frac{t}{r(t)}$,

Где $r(t)$ – число отказов, фактически зарегистрированных за суммарную наработку t .

5. *Интенсивность отказов* $\lambda(t)$ — условная плотность вероятности возникновения отказа данного объекта, определяемая при условии того, что до рассматриваемого момента отказов объекта не произошло.

Вероятностное определение $\lambda(t) = \frac{f(t)}{1 - F(t)} = \frac{f(t)}{P(t)}$.

Статистическая оценка $\bar{\lambda} = \frac{n(\Delta t)}{N \Delta t}$, ч⁻¹,

где $n(\Delta t)$ – количество объектов, отказавших в интервале времени Δt ;
 N – число объектов, безотказно работающих к моменту времени Δt ;
 Δt – величина рассматриваемого интервала.
 Расчётно-графическая иллюстрация $\lambda(t)$ показана на рисунке 5.

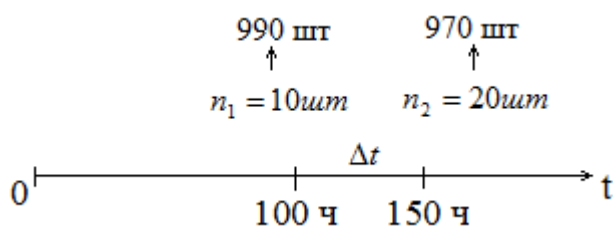


Рисунок 5 – Иллюстрация оценки $\lambda(t)$

Каково значение λ к моменту $t=150$ часов? $\Delta t=100$ ч.

К середине интервала $\Delta t/2=100/2=50$ ч количество безотказно работающих объектов составит $\frac{990+970}{2} = 980$ шт. При этом $\lambda(150) = \frac{20}{980 \cdot 100} \text{ ч}^{-1}$.

Иногда наряду со стандартным показателем $\lambda(t)$ используется нестандартный показатель — частота отказа $a(t)$.

Аналитическое выражение $a(t) = \frac{dQ(t)}{dt} = Q'(t) = -P(t)$.

Здесь знак «-» с учётом того, что $Q(t) = 1 - P(t)$.

Статистическая оценка $\bar{a}(t) = \frac{n(\Delta t)}{N_0 \Delta t}$,

$n(\Delta t)$ – число объектов, отказавших в интервале времени Δt ;

N_0 – количество первоначально поставленных на испытание объектов.

Графическое изображение понятия $\bar{a}(t)$ приведено на рисунке 6.

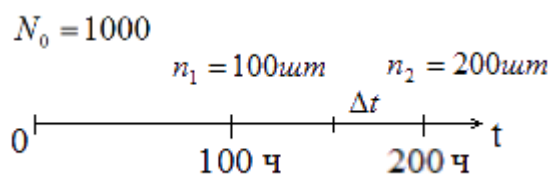


Рисунок 6 – Иллюстрация оценки $a(t)$

При данных условиях $a(t=100) = \frac{100}{1000 \cdot 100} = 0,001 \text{ ч}^{-1}$.

6. Параметр потока отказов $\mu(t)$ — это отношение среднего числа отказов восстанавливаемого объекта за произвольно малую его наработку к значению это наработки.

Вероятностное определение $\mu(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow \infty} -\frac{M[r(t+\Delta t) - r(t)]}{\Delta t}$; или $\mu(t) = n(\Delta t) / \sum t_i \Delta t$.

Математическое ожидание для непрерывных величин:

$$M = \int_a^b x f(x) dx,$$

$f(x)$ – плотность распределения;

Математическое ожидание дискретных величин:

x	1	2	3	4	...
p	P_1	P_2	P_3	P_4	...

$$\sum P_i = 1,$$

$$M = \sum_{i=1}^N x_i P_i.$$

Здесь $r(t)$ – число отказов за время t ;

$r(t + \Delta t)$ – число отказов за время $(t + \Delta t)$ или математическое ожидание числа отказов к моменту времени Δt ;

$n(\Delta t)$ – среднее число отказов за наработку Δt ;

$\sum t_i$ – суммарная наработка.

Статистическая оценка $\bar{\mu}(t) = \frac{r_2 - r_1}{t_2 - t_1}$ или $\bar{\mu}(t) = \sum n_i(\Delta t) / N_o \Delta t$.

Здесь r_2 – число отказов в конце промежутка времени t_2 ;

r_1 – число отказов в начале промежутка времени t_1 ;

$t_1 - t_2$ – начало и конец промежутка времени;

N_o – число изделий, поставленных на испытание.

7. Осреднённый параметр потока отказов $\mu_{cp}(t)$.

По сравнению с вероятностным определением параметра потока $\mu(t)$, вероятностное определение осреднённого $\mu_{cp}(t)$ показывает математическое ожидание числа отказов за конечный промежуток времени от t_1 до t_2 .

Вероятностное выражение $\mu_{cp}(t) = \frac{M[r_2 - r_1]}{t_2 - t_1}$.

Статистическая оценка $\bar{\mu}(t) = \frac{r_2 - r_1}{t_2 - t_1}$.

Для стационарного осреднённого потока $\mu_{cp}(t)$ применяется формула

$$\bar{\mu}(t) = \frac{1}{T},$$

т.е. величина, обратная средней наработке на отказ \bar{T} .

3.3 Показатели надежности по свойству долговечности

Стандартом рекомендованы следующие показатели:

1. Гамма-процентный ресурс $T_{p,\gamma}$;
2. Гамма-процентный срок службы $T_{сл,\gamma}$.

Ресурс — наработка объекта, в течение которой объект не достигает предельного состояния с вероятностью γ , выраженной в %.

Срок службы — календарное количество дней эксплуатации объекта, при котором эксплуатируемый объект не достигает предельного состояния.

Суммарная наработка $T_{p,\gamma}$ определяется следующим образом:

$$P(t_\gamma) = \frac{\gamma}{100}; F(t_\gamma) = 1 - \frac{\gamma}{100}.$$

Выбирают значение $\gamma = 50\%$ и более.

Пример. Пусть случайная величина T_p (время ресурса) имеет экспоненциальное распределение, $\gamma = 99\%$, известна интенсивность отказов λ_p . Определить $T_{p,\gamma}$.

Квантиль — значение случайной величины t_γ , которой соответствует заданная вероятность γ .

Расчётные формулы:

$$P(t_\gamma) = \frac{99}{100} = 0,99;$$

$$T_p = -\frac{\ln P(t)}{\lambda}.$$

Графическое изображение $P(t)$ и $F(t)$ представлены на рисунке 7.

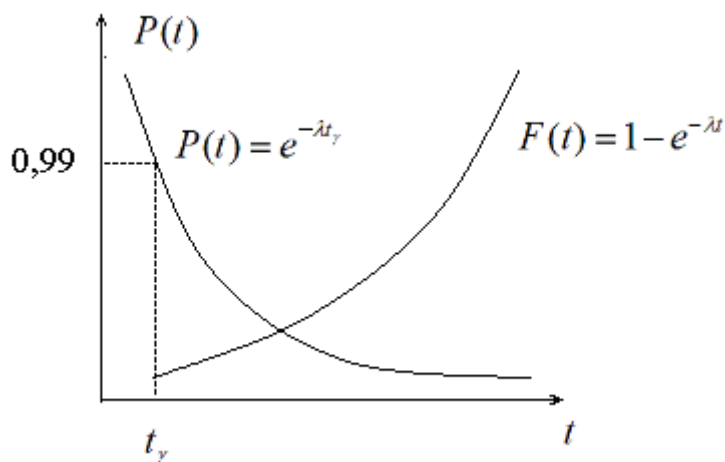


Рисунок 7

3. Средний ресурс $T_{p,ср}$.

4. Средний срок службы $T_{сл,ср}$.

Формулы определения $T_{p,ср}$ и $T_{сл,ср}$:

$$T_{p,ср} = M[T_p] = \int_0^{\infty} [1 - F(t)] dt;$$

$$T_{сл,ср} = M[T_{сл}] = \int_0^{\infty} [1 - F(t)] dt, \text{ где}$$

$F(t)$ — функция распределения случайной величиной T_p (ресурс) или $T_{сл}$ (срок службы).

Наработка на или до отказа — это случайная величина.

Случайное событие — это всякий факт, который в результате проведения опыта (эксперимента, наблюдения) может произойти или нет.

Случайная величина — величина, которая в результате опытов (экспериментов) может принимать значения случайным образом.

Случайная величина может быть задана таблицей со значениями вероятностей $P(t)$ или в виде функции распределения $F(t)$.

Лекция 5

3.4 Показатели надёжности по свойству ремонтпригодности

1. Вероятность восстановления $P(t_g)$ — это вероятность того, что заданное время восстановления t_g не будет превышать среднее время восстановления T_B .

Статистическая оценка $\bar{P}(t_g) = \frac{n_g(t_g)}{N_g}$,

где N_B — число объектов, поставленных на восстановление;

n_B — Число восстановленных объектов к моменту времени t_B .

Вероятностное выражение $P(t_g) = P\{T_g > t_g\}$, где

T_B — среднее время восстановления объекта;

t_B — заданное время восстановления объекта.

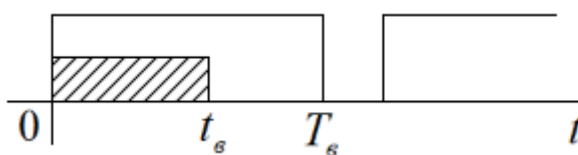


Рисунок 8 – Графическое изображение t_B и T_B

Вероятность восстановления равна:

$$P(\tau_g) = 0 \dots 1; \quad P(0) = 0; \quad P(\infty) = 1.$$

2. *Гамма-процентное время восстановления* определяется по аналогии с другими показателями, однако здесь берётся функция распределения времени восстановления $F(t_B)$.

3. *Среднее время восстановления T_B* — это математическое ожидание времени восстановления $M(t_B)$ или это

$$T_g = \int_0^{\infty} P(t_g) dt = \int_0^{\infty} 1 - F(t_g) dt.$$

Статистическая оценка $\bar{T}_g = \frac{\sum_{i=1}^{N_g} t_{gi}}{N_g}$, где

$\sum_{i=1}^{N_g} t_{gi}$ — сумма времени восстановления;

N_B — количество объектов, поставленных на восстановление.

4. *Интенсивность восстановления λ_g* , выводится аналогично интенсивности отказов (в аналитическом, статистическом и вероятностном виде). Формула статистической оценки имеет вид:

$$\lambda_g = \frac{n(\Delta t_g)}{N_g \Delta t_g}, \text{ где}$$

$n(\Delta t_g)$ — количество восстанавливаемых объектов в промежутке времени Δt_g ;

N_B – среднее число объектов, которые не были восстановлены в интервале времени Δt_g .

5. Средняя трудоёмкость восстановления $C_{cp.g}$ — это математическое ожидание трудоёмкости восстановления объекта. Формулы аналитического определения и статистической оценки имеют вид:

$$C_{cp.g} = M[C_g];$$

$$\bar{C}_{cp.g} = \frac{\sum_{i=1}^{N_g} C_{g,i}}{N_g}.$$

3.5 Показатели надёжности по свойству сохраняемости

К показателям сохраняемости относятся:

1. Гамма-процентный срок сохраняемости $T_{c,\gamma}$.
2. Средний срок сохраняемости $T_{c,cp}$.

Выражения для определения значений показателей сохраняемости имеют вид:

1. Гамма-процентный срок сохраняемости $T_{c,\gamma}$, достигаемый объектом с заданной вероятностью γ в %, определяется как корни t_γ из выражения

$$P(t_c)_\gamma = 1 - F(t_c)_\gamma = \frac{\gamma_c}{100};$$

2. $T_{c,cp} = \int_0^{\infty} P(t_{c,cp}) dt = \int_0^{\infty} [1 - F(t_{c,cp})] dt$ — математическое ожидание срока сохраняемости.

$$\text{Статистическая оценка } T_{c,cp} = \frac{1}{N_c} \sum_{i=1}^{N_c} t_{c,i},$$

где N — число работоспособных объектов, поставленных на сохранение при $t_c=0$;

$t_{c,i}$ — время сохранения каждого объекта.

Лекция 6

3.6 Комплексные показатели надёжности

1. Коэффициент готовности K_z — это вероятность того, что объект окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени t , кроме планируемых периодов, когда использование объекта по назначению не предусматривается,

$$K_z = \frac{T}{T + T_g},$$

T — среднее время безотказной работы;

T_B — среднее время восстановления.

Статистическая оценка $K_z = \frac{\sum T_i}{\sum T_i + \sum T_{gi}}$.

Она характеризует долю времени, когда объект работает безотказно.

2. Коэффициент простоя K_n (не стандартный показатель), обратный K_z ,
 $K_n = 1 - K_z$.

3. Коэффициент оперативной готовности K_{oz} — вероятность того, что объект окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени t , кроме планируемых периодов, когда использование объекта по назначению не предусматривается и, начиная с этого момента объект будет работать безотказно в течении заданного интервала времени (Рисунок 9).

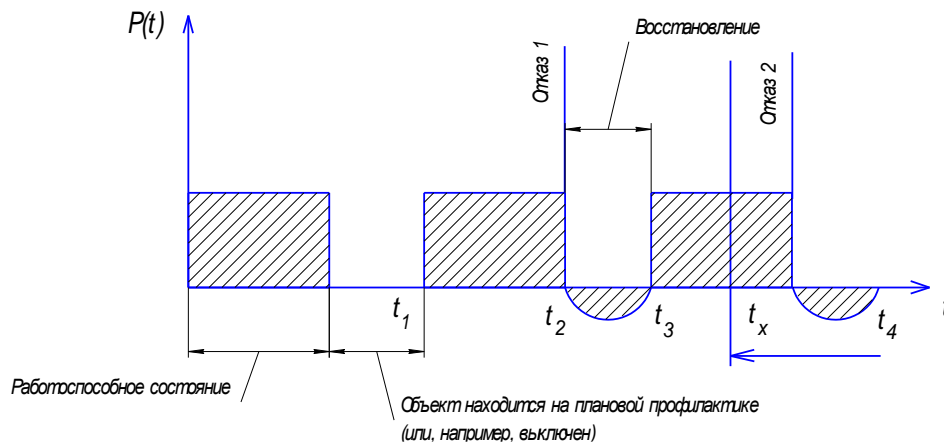


Рисунок 9 – Графическое отображение K_{oz}

K_T – вероятность того, что объект в работоспособном состоянии в произвольный момент времени;

K_{OT} – вероятность того, что объект в некоторый момент t_x в работоспособном состоянии и вероятность того, что данный объект проработает ещё время t_4 ,

$$K_{Oz} = K_z \times P(t_x, t_4),$$

P – условная вероятность безотказной работы объекта на интервале времени (t_x, t_4) , при условии, что в момент времени t_x объект находится в работоспособном состоянии.

4. Коэффициент технического использования $K_{m.u.}$ — отношение математического ожидания суммарного времени пребывания объекта в работоспособном состоянии за некоторый, интересующий нас интервал времени эксплуатации t , к математическому ожиданию суммарного времени пребывания этого объекта в работоспособном состоянии и простоях, обусловленных техобслуживанием и ремонтом за тот же период времени эксплуатации

$$K_{m.u.} = \frac{M[\sum T_p]}{M[\sum T_p] + M[\sum T_{об}] + M[\sum T_{рем}]},$$

где T_p – время работоспособного состояния; $T_{об}$ – время обслуживания, $T_{рем}$ – время ремонта, M – математическое ожидание среднего времени.

5. Коэффициент сохранения эффективности $K_{эф}$ — отношение значения показателя эффективности использования объекта по назначению за определённый период эксплуатации к номинальному значению этого показателя эффективности, вычисленному при условии, что отказы объекта в течении этого периода не возникают,

$$K_{эф} = \frac{E(t_1, t_2)}{E_{н.о.м.}}$$

По сути $K_{эф}$ представляет собой произведение коэффициента $K_{о.з.}$ на вероятность того, что время безотказной работы объекта превышает заданное или установленное время

$$K_{эф} = K_{о.з.} \cdot P(t_{б.р.}),$$

$t_{б.р.}$ — время безотказной работы.

3.7 Периоды жизненного цикла изделия

Интенсивность отказов изделия характеризуется сложной кривой (Рисунок 10).

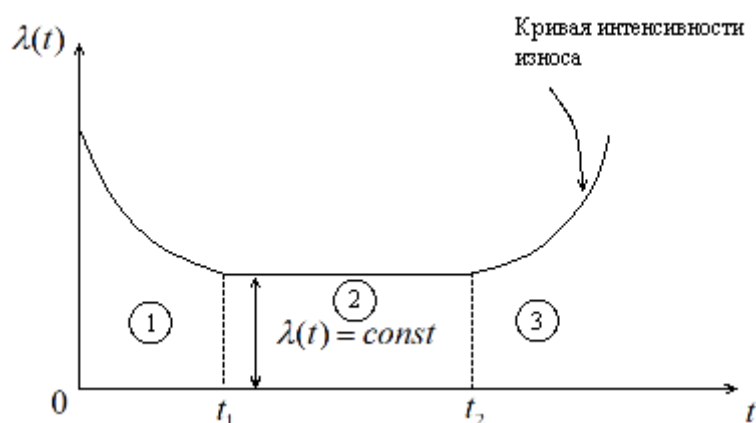


Рисунок 10 – График жизненного цикла изделия

Здесь $t_0...t_1$ — участок *приработки* изделий, характеризуется большим числом отказов, что обусловлено технологическими отказами, ошибками проектирования, нарушением этапов производства. В этом периоде объект регулируют и заменяют вышедшие из строя детали. За первым периодом наступает *период нормальной эксплуатации* в интервале t_1-t_2 . За вторым периодом наступает третий *период старения и износа*.

С момента времени t_2 наступает предельное состояние изделия. Для участков времени 1, 2 и 3 применяются соответствующие законы распределения для описания случайных величин, в данном случае интенсивности отказов λ во времени t :

для участка 2 — экспоненциальный закон;

для участка 3 — часто используется нормальный закон Гаусса;

для участка 1 — закон Вейбулла-Гнеденко.

Первый и третий временной периоды по отношению ко второму небольшие. По длительности $2 > 1 > 3$.

Лекция 7

4. ОСНОВНЫЕ ЗАКОНЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СЛУЧАЙНЫХ ВЕЛИЧИН

1. Экспоненциальное распределение.

$F(t) = 1 - e^{-\lambda t}$ — экспоненциальный закон.

$Q(t) = 1 - e^{-\lambda t}$ — вероятность отказа.

$P(t) = 1 - Q(t) = 1 - F(t) = e^{-\lambda t}$ — вероятность безотказной работы объекта.

$[e^{-\lambda t}]$ — функция надёжности. Средняя наработка на отказ T ,

$$T = \int_0^{\infty} P(t) dt = \int_0^{\infty} (1 - Q(t)) dt.$$

Графическое отображение показателей надёжности при экспоненциальном распределении показано на рисунке 11.

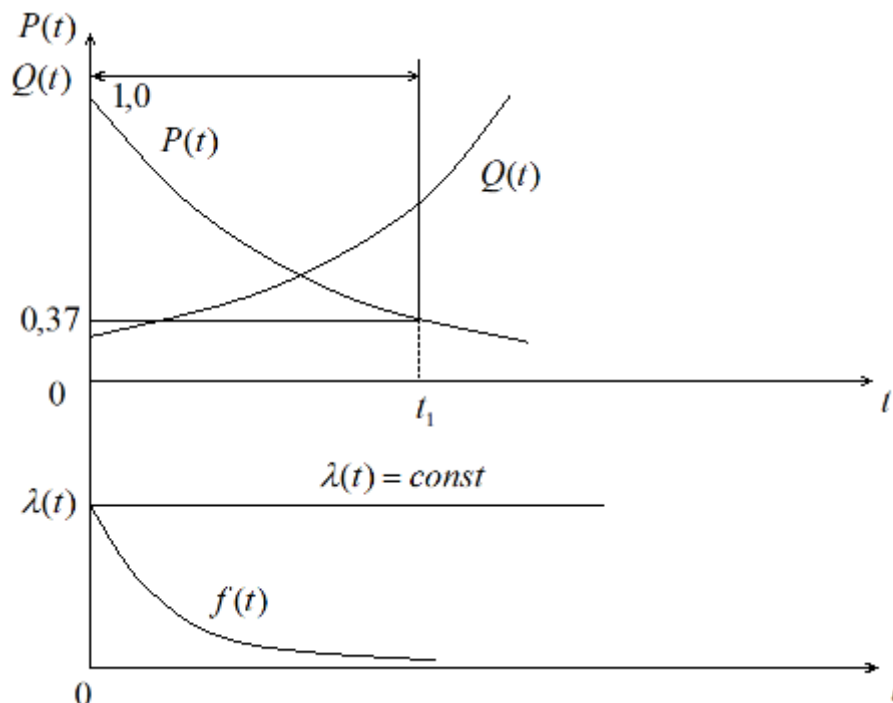


Рисунок 11 – Графики изменения показателей надёжности при экспоненциальном распределении.

Важная зависимость для экспоненциального закона: если заданное t_1 будет равно среднему времени безотказной работы T (наработка до отказа), то значение вероятности безотказной работы $P(t) = 0,37$. Из этого следует, что эксплуатировать изделие необходимо задолго до средней наработки до отказа.

Производная функции распределения $F(t)$ есть плотность вероятности $f(t)$;

$$F'(t) = f(t) = \lambda e^{-\lambda t} = a(t), \text{ где}$$

$a(t)$ – частота отказов.

Интенсивность отказов

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)} = \frac{a(t)}{P(t)} = \frac{\lambda e^{-\lambda t}}{e^{-\lambda t}} = \lambda = const, \text{ т.е.}$$

λ – не зависит от времени (остаётся постоянной) при экспоненциальном распределении. Экспоненциальный закон однопараметрический (параметр λ). Он наиболее простой в практическом применении.

2. Нормальное (гауссово) распределение

Этот закон двухпараметрический (параметры T и σ). Графическое отображение показателей надёжности имеет вид (рис. 12)

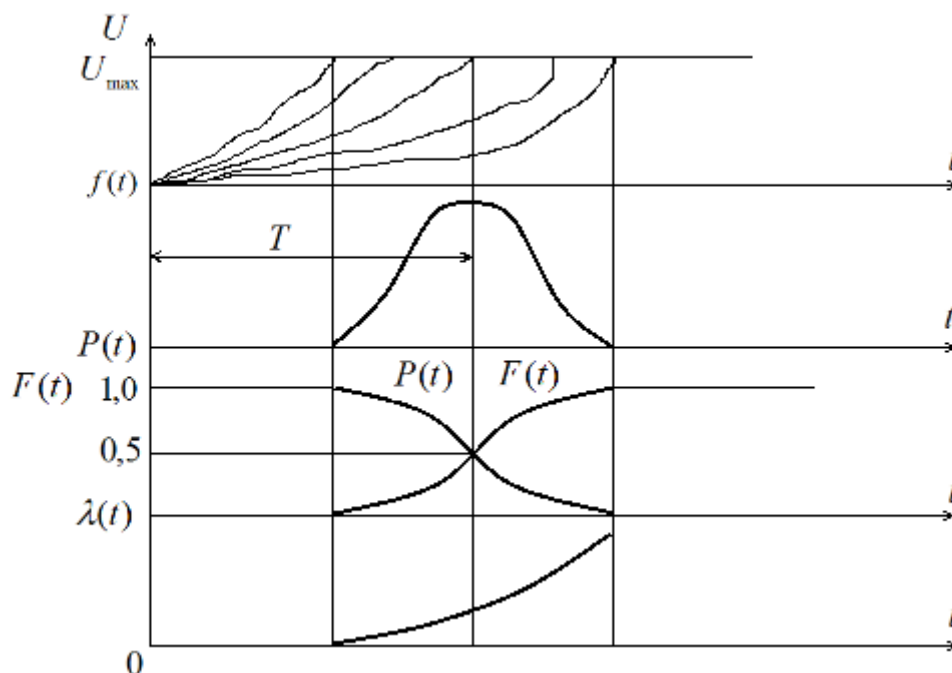


Рисунок 12. Нормальное распределение параметров надёжности

$$f(t) = Q(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\left[\frac{(t-T)^2}{2\sigma^2}\right]} \text{ – плотность вероятности.}$$

$$F(t) = Q(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\left[\frac{(t-t)^2}{2\sigma^2}\right]} dt \text{ – интегральная функция распределения.}$$

$$P(t) = 1 - F(t) = 1 - Q(t) \text{ – вероятность безотказной работы.}$$

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)} \text{ – интенсивность отказов.}$$

3. Распределение Вейбулла-Гнеденко

Этап приработки хорошо описывается распределением Вейбулла-Гнеденко. Аналитические выражения параметров надёжности имеют следующий вид:

$$F(t) = 1 - e^{-\alpha t^k};$$

$$P(t) = e^{-\alpha t^k};$$

$$f(t) = \alpha k t^{k-1} \cdot e^{-\alpha t^k};$$

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

Графическое отображение показателей надёжности имеет вид (рис. 13).

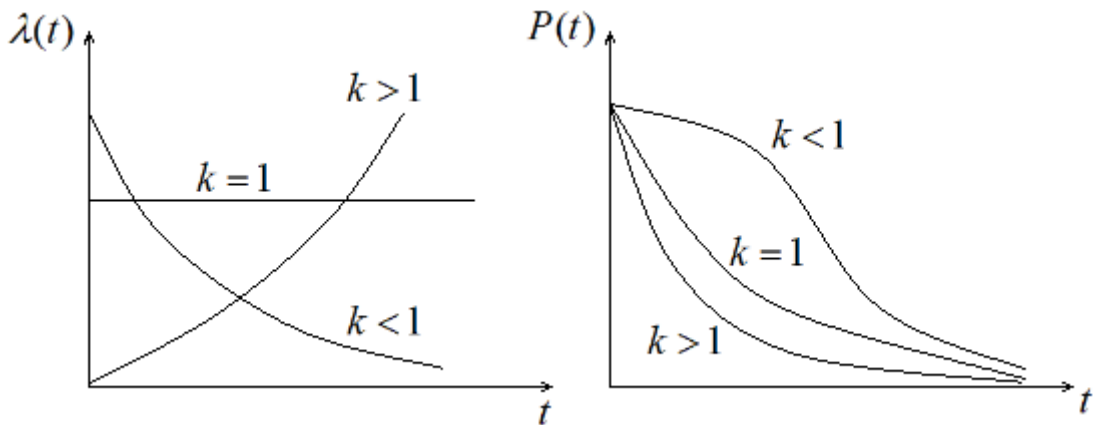


Рисунок 13 – Графическое отображение показателей надёжности

Здесь α, k – параметры распределения Вейбулла-Гнеденко:

α – параметр, определяющий масштаб распределения;

k – параметр, определяющий вид плотности (форму) распределения.

Данный закон универсальный. В зависимости от значения k , он принимает вид частных распределений: нормального, экспоненциального и др. При $k = 1$ распределение экспоненциальное, если $k > 1$ – стремится к нормальному,

При $k = 0,2...0,4$ – распределение принимается для описания надёжности электронных устройств, а при $k = 1,2...1,4$ – хорошо описывает надёжность ряда механических систем (объектов). При наличии внезапных отказов применяется экспоненциальное распределение, а при постепенных — нормальное распределение. Вероятность внезапного и постепенного отказа описывается выражением вида

$$P(t) = P_{\text{вн}}(t) \cdot P_{\text{пост}}(t) = e^{-\lambda t} [1 - F_{\text{норм}}(t)].$$

Лекция 8

5. РАСЧЁТ НАДЁЖНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

При данном расчёте учитывают:

1. Восстанавливаемая или невосстанавливаемая система.
2. Резервированная или нерезервированная система.

5.1 Расчёт надёжности невосстанавливаемых и нерезервированных систем

1. Последовательное соединение невосстанавливаемых систем.

Расчётная схема (рис. 14)

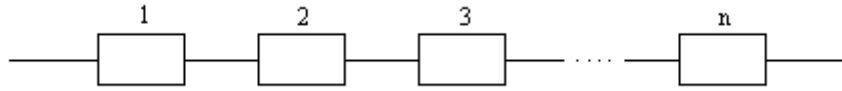


Рисунок 14 – Последовательное соединение элементов в системе

Вероятность безотказной работы системы — это произведение вероятностей безотказной работы каждого из её элементов. Принимаем отказы внезапными, а распределение экспоненциальным. Расчётные выражения:

$$P_c(t) = P_1(t)P_2(t)P_3(t)\dots P_n(t) = \prod_{i=1}^n P_i(t);$$

$$\lambda_c(t) = \sum \lambda_i(t);$$

$$P_c(t) = \prod_{i=1}^n e^{-\lambda_i(t)};$$

$$P_c(t) = (1 - Q_1(t))(1 - Q_2(t))(1 - Q_3(t))\dots(1 - Q_n(t)).$$

Пример. Дано: $\lambda_1(100) = 10^{-5} \text{ ч}^{-1}$;

$$\lambda_2(100) = 10^{-4} \text{ ч}^{-1};$$

$$\lambda_3(100) = 10^{-2} \text{ ч}^{-1};$$

$$t = 100 \text{ ч}.$$

Определить $P_c(100)$.

Решение. $P_c(100) = (e^{-10^{-5} \cdot 100})(e^{-10^{-4} \cdot 100})(e^{-10^{-2} \cdot 100})$.

Экспоненциальное распределение является однопараметрическим, т.к. достаточно знать только один параметр, например λ – интенсивность отказов.

Нормальное распределение — двухпараметрическое: математическое ожидание (среднее время безотказной работы T и среднее квадратическое отклонение σ , которые определяются опытным путём).

5.2 Невосстанавливаемые системы с постоянным нагруженным резервом

Систему, приведённую на рисунке 15, называют дублированной. Она включает в себя основной элемент 1 и резервный 2.

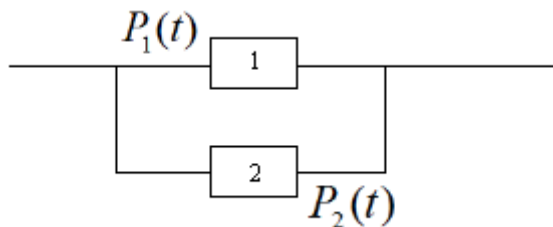


Рисунок 15 – Дублированная система

Элементы 1 и 2 работают в одинаковых режимах с одинаковой нагрузкой.

Вероятность безотказной работы системы $P_c(t)$ равна единице минус произведение вероятностей отказов каждого из элементов:

$$P_c(t) = 1 - (Q_1(t) \cdot Q_2(t));$$

$$Q_c(t) = \prod_{i=1}^n Q_i(t) = Q_1(t) \cdot Q_2(t);$$

$$Q_1(t) = 1 - P_1(t) \text{ и } Q_2(t) = 1 - P_2(t);$$

$$P_c(t) = 1 - Q_c(t).$$

3. Смешанное соединение в схеме

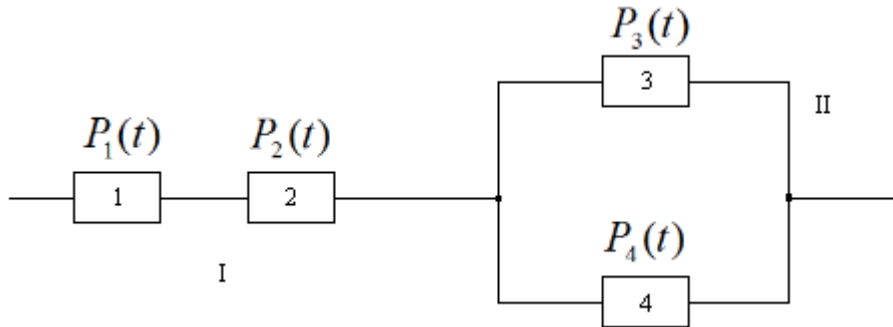


Рисунок 16 – Смешанное соединение

Смешанное соединение (рис. 16) представляет собой объединённые схемы рис. 14 и 15. Расчётные выражения вероятности безотказной работы системы имеют следующий вид:

$$P_I = P_1(t) \cdot P_2(t);$$

$$P_{II} = 1 - ((1 - P_3(t))(1 - P_4(t)));$$

$$P_c(t) = P_I \cdot P_{II}.$$

5.3 Структурное резервирование. Схемы резервирования

Резервирование — это способ обеспечения надёжности объекта за счёт использования дополнительных средств или возможностей, избыточных по отношению к минимально необходимым для выполнения требуемых задач.

Резерв — совокупность средств или возможностей дополнительно используемых для резервирования.

Резервирование — это наиболее эффективный путь обеспечения заданной надёжности или её повышения до требуемого уровня. Используя резервирование, можно из мало надёжных элементов создавать высоко надёжные объекты или системы.

Виды возможного резервирования приведены на рисунке 17.

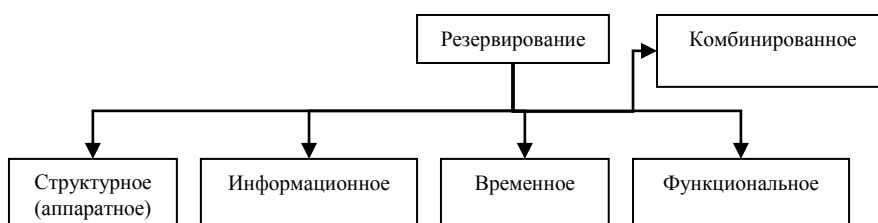


Рисунок 17 – Виды резервирования

Структурное резервирование — введение избыточной структуры (дополнительных элементов).

Информационное резервирование — введение дополнительной информации (повторение передачи данных по модему).

Временное резервирование — введение дополнительного времени на выполнение какой-либо функции.

Функциональное резервирование — введение дополнительных функций.

Комбинированное резервирование — применяется в разных системах безопасности (как правило, это структурное и информационное резервирование).

Широкое распространение получило структурное резервирование (оно понятно разработчику, доступно для реализации, обеспечивает высокую эффективность и надёжность). В данном курсе рассматривается этот вид резервирования.

Классификация структурного резервирования приведена на рисунке 18.

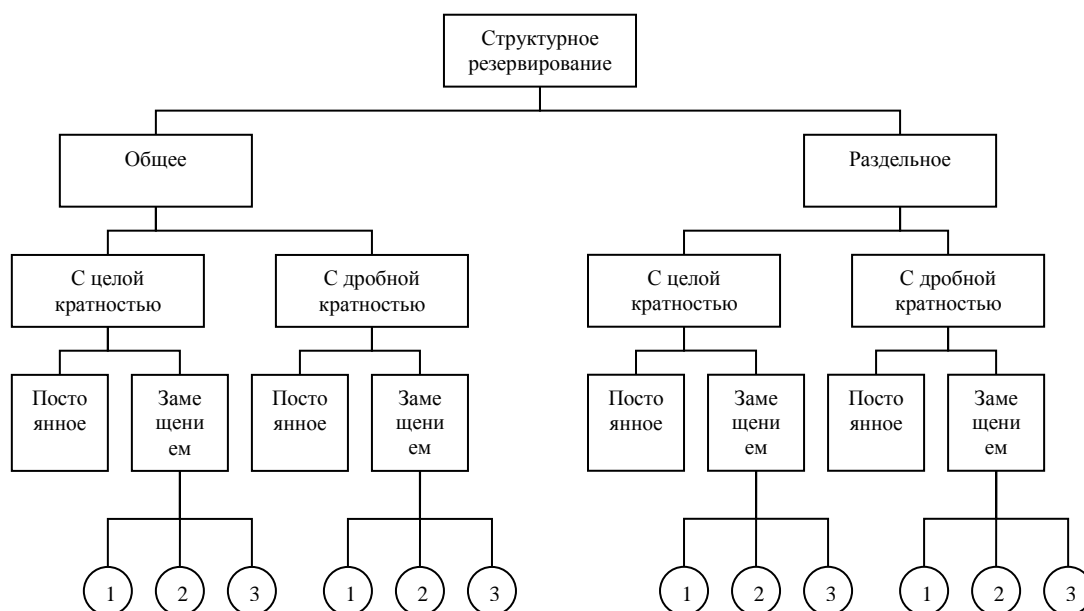


Рисунок 18 – Состав структурного резервирования

Здесь:

1 – нагруженное (горячее);

2 – облегченное (тёплое);

3 – ненагруженное (холодное).

Основной элемент — элемент объекта или системы, необходимый для выполнения требуемых функций (без использования резерва).

Резервный элемент — элемент объекта, предназначенный для выполнения функций основного элемента в случае его отказа.

Кратность резервирования — отношение числа резервных элементов к числу резервируемых (основных) элементов, выраженное несокращаемой простой дробью

$$k = \frac{m}{n}$$

Например, $k = \frac{2}{4} \rightarrow 4$ – основные элементы; 2 – резервные элементы.

Дублирование — это резервирование с кратностью один к одному, $K = \frac{1}{1}$.

Общее резервирование — резервирование, при котором резервируется объект в целом.

Раздельное резервирование — резервируются отдельные элементы объекта или группы элементов.

Постоянное резервирование — резервирование, при котором используется нагруженный резерв и при отказе любого элемента в резервированной группе выполнение объектом требуемых функций обеспечивается оставшимися элементами без каких-либо переключений.

Замещение — резервирование, при котором функции основного элемента передаются резервному только после отказа основного элемента.

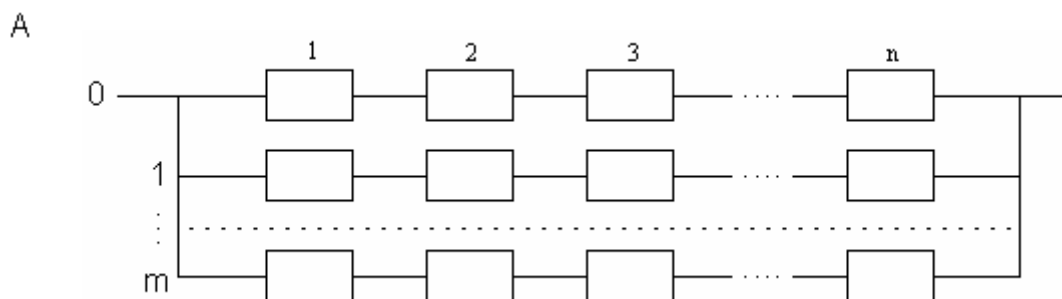
Нагруженный резерв — резерв, содержащий один или несколько резервных элементов, которые находятся в режиме работы основного элемента.

Обеспеченный резерв — резерв, при котором один или несколько основных элементов находятся в режиме менее нагруженном, чем основной элемент.

Ненагруженный резерв — резерв, при котором один или несколько резервных элементов резервируется одним или несколькими резервными элементами, при этом резервные элементы находятся в ненагруженном состоянии (отключены). Большую роль играет надёжность переключающих устройств.

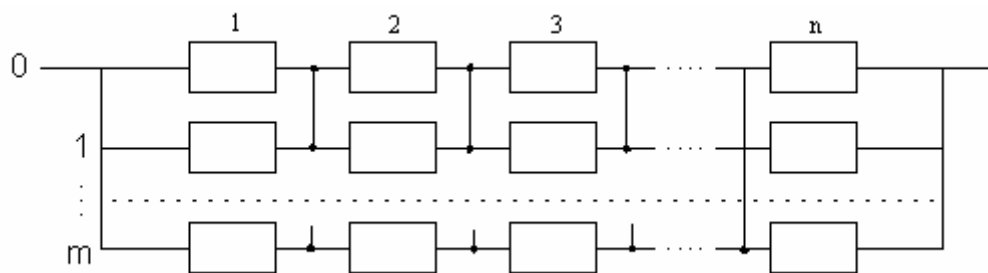
5.4 Схемы резервирования

Типовые схемы резервирования позволяют принять адекватный метод расчёта (математический аппарат) показателей надёжности технического объекта. Эти системы приведены на рисунке 19.



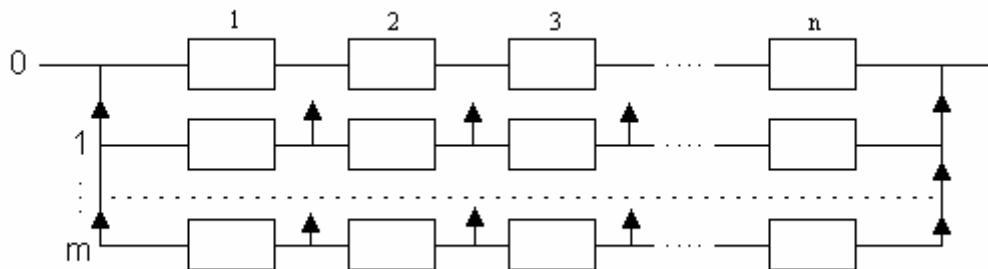
Пусть $m=3$, целая кратность общего постоянного резервирования $k=3/1$. “0” – обозначается основная цепь элементов.

Б



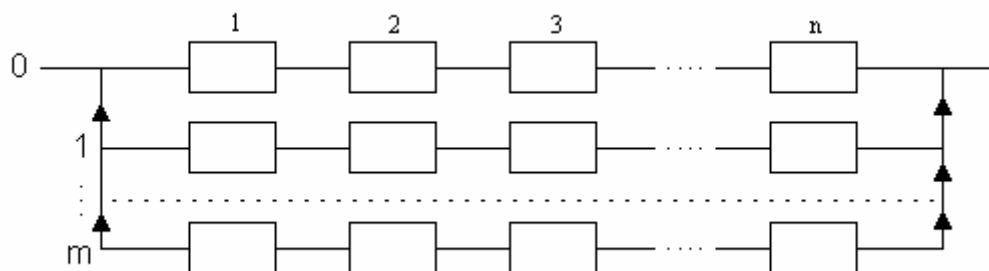
Раздельное постоянное резервирование с целой кратностью

В



Раздельное резервирование с целой кратностью с замещением

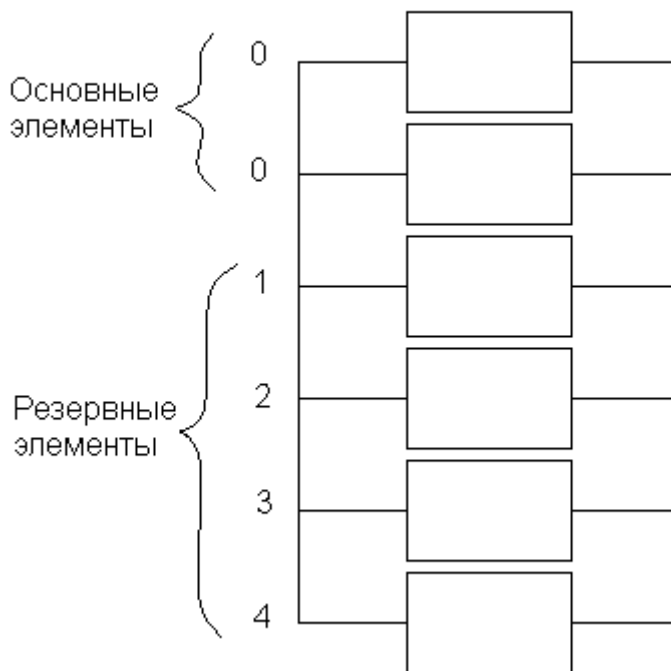
Г



Общее резервирование с целой кратностью с замещением

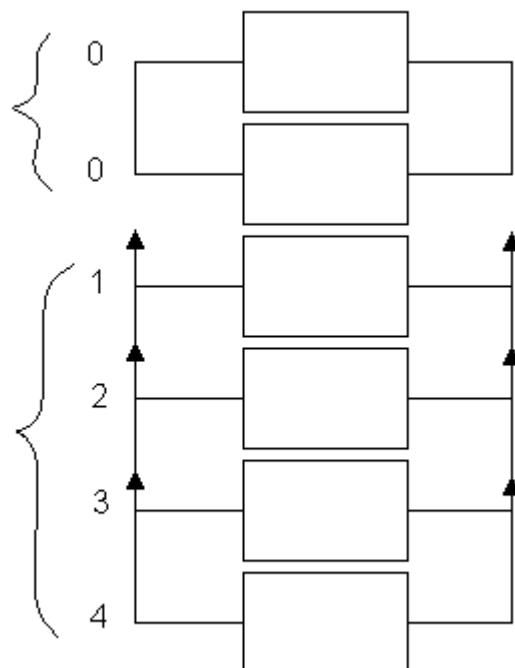
▲ – обозначается замещение. Для общего резервирования стрелка ставится только на концах цепи схемы.

Д

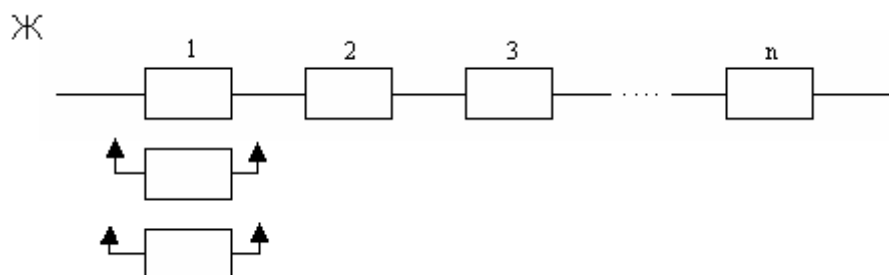


Общее постоянное резервирование с дробной кратностью, например $k=2/4$.

Е

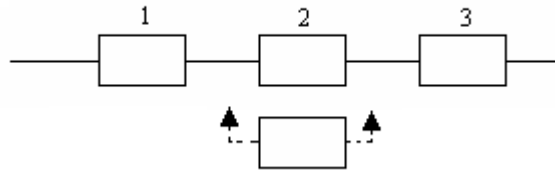


Общее резервирование с замещением с дробной кратностью, например $k=4/2$



Раздельное замещение с дробной кратностью, например, $k=2/4$, $n=4$, $m=2$.

3



Скользящее резервирование; резервный элемент может резервировать любой из основных элементов, например $k=1/3$, $n=1$, $m=3$.

Рисунок 19 – Схемы резервирования: А, Б, В, Г, Д, Е, Ж, З.

Лекция 9

6. РАСЧЁТ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЁЖНОСТИ НЕВОССТАНАВЛИВАЕМЫХ РЕЗЕРВИРОВАННЫХ СИСТЕМ

6.1 Расчёт показателей надёжности при последовательном соединении элементов в схеме

При последовательной расчётной схеме отказы элементов независимы между собой и отказ каждого элемента ведёт к отказу всей системы.

Структурно-логическая расчётная схема составляется на основе структурно-функциональной схемы, и элементы в ней соединены последовательно, независимо от соединения элементов в структурно-функциональной схеме. Она имеет вид, представленный на рисунке 20.



Рисунок 20 – Структурно-расчётная схема

При произвольном законе распределения наработки до отказа отдельных элементов результирующая надёжность системы $P_c(t)$ рассчитывается по вероятности безотказной работы элементов $P_i(t)$, $P_c(t) = P_1(t) \cdot P_2(t) \cdot P_3(t) \dots P_n(t) = \prod_{i=1}^n P_i(t)$, а вероятность отказа системы $Q_c(t)$ по выражению $Q_c(t) = 1 - P_c(t) = 1 - \prod_{i=1}^n P_i(t)$.

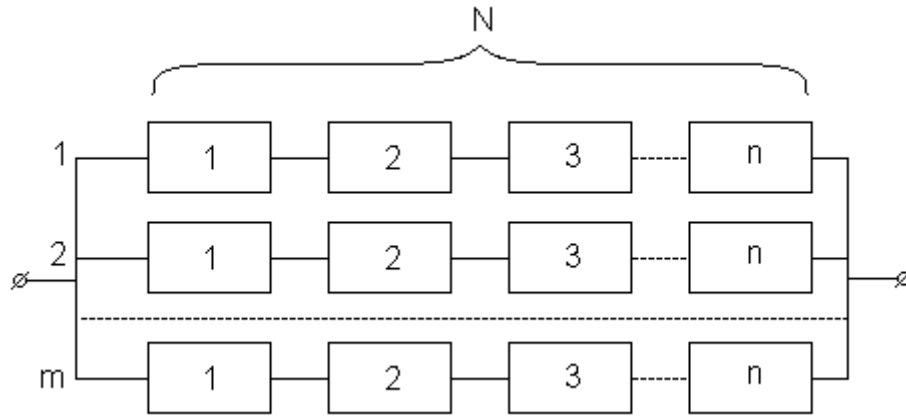


Рисунок 21 – Схема последовательно-параллельного соединения элементов, общего, целой кратности постоянно-включенного резерва.

Если система состоит из m параллельно включенных цепочек с n блоками (элементами) в каждой цепочке, согласно схеме с общим резервированием, целой кратностью и постоянно включенным резервом (рис. 21), с одинаковой вероятностью безотказной работы P_i , тогда надёжность каждой последовательной резервной цепочки

$P_y = P_1 \cdot P_2 \cdot P_n = P$ — если вероятность элементов в цепочке одинаковая, а если разная, то

$$P_y = P_1 \cdot P_2 \cdot P_n = \prod_{i=1}^n P_i.$$

Вероятность отказов каждой цепочки

$$Q_y = (1 - P^n) \text{ или } Q_y = 1 - \prod_{i=1}^n P_i.$$

Результирующая вероятность безотказной работы всей системы

$P_c(t) = \{1 - [(1 - P^n)_1 \cdot (1 - P^n)_2 \dots (1 - P^n)_m]\} = 1 - (1 - P^n)^m$, а вероятность отказа системы $Q_c(t) = 1 - P_c(t)$.

Вероятность безотказной работы всей системы с учётом разной вероятности элементов

$$P_c(t) = 1 - Q_c(t) = 1 - \prod_{j=1}^m Q_j(t) = 1 - \prod_{j=1}^m (1 - P_j(t)) = 1 - \prod_{i=1}^m \left(1 - \prod_{i=1}^n P_{ij}(t) \right).$$

6.2 Расчёт показателей надёжности при параллельном соединении элементов в схеме

Параллельное соединение элементов используется как способ повышения надёжности систем. В этом случае используется резервирование элементов, показанных на схеме (рис 22).

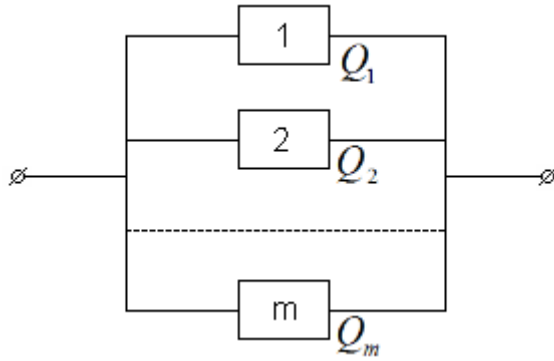


Рисунок 22 – Структурно-логическая расчётная схема надёжности при параллельном включении элементов

1. Результирующая вероятность отказа невосстанавливаемой системы

$$Q_c(t) = Q_1(t) \cdot Q_2(t) \dots Q_m(t) = \prod_{j=1}^m Q_j(t).$$

2. Результирующая вероятность безотказной работы системы до отказа

$$P_c(t) = 1 - \prod_{j=1}^m Q_c(t) = 1 - \prod_{j=1}^m (1 - P_j(t)).$$

3. Если все элементы системы имеют одинаковую надёжность, то

$$P_c(t) = 1 - (1 - P_j(t))^m.$$

Для структурно-логической расчётной схемы надёжности, состоящей из M параллельно включенных блоков, последовательно соединённых групп, при раздельном резервировании элементов n , постоянно включённым резервом и целой кратностью (рис. 23).

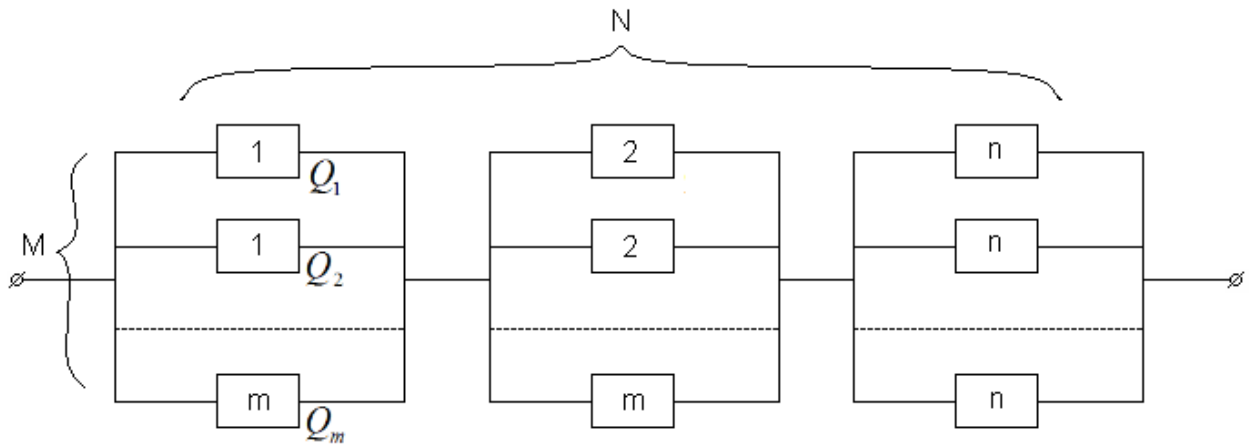


Рисунок 23 – Структурно-логическая расчётная схема надёжности при параллельно-последовательном включении элементов

Примем, что надёжность всех блоков одинаковая, тогда вероятность безотказной работы параллельной группы элементов M

$$P_2 = 1 - Q^M, \text{ а надёжность всей системы } P_c = (1 - Q^M)^N \text{ или } P_c(\tau) = \prod_{i=1}^N \left[1 - \prod_{j=1}^M (1 - P_{ij}) \right],$$

где в i -ом блоке M – количество параллельно включенных элементов в группе; N – количество последовательно включенных групп.

6.3 Расчёт показателей надёжности при комбинированном соединении элементов схем

Дана структурно-логическая расчётная схема пускорегулирующей аппаратуры, приведённая на рисунке 24. Известны вероятности безотказной работы входящих в неё элементов. Требуется найти вероятность безотказной работы системы в целом. Система состоит из двух цепей (А, В, С и D) разной надёжности.

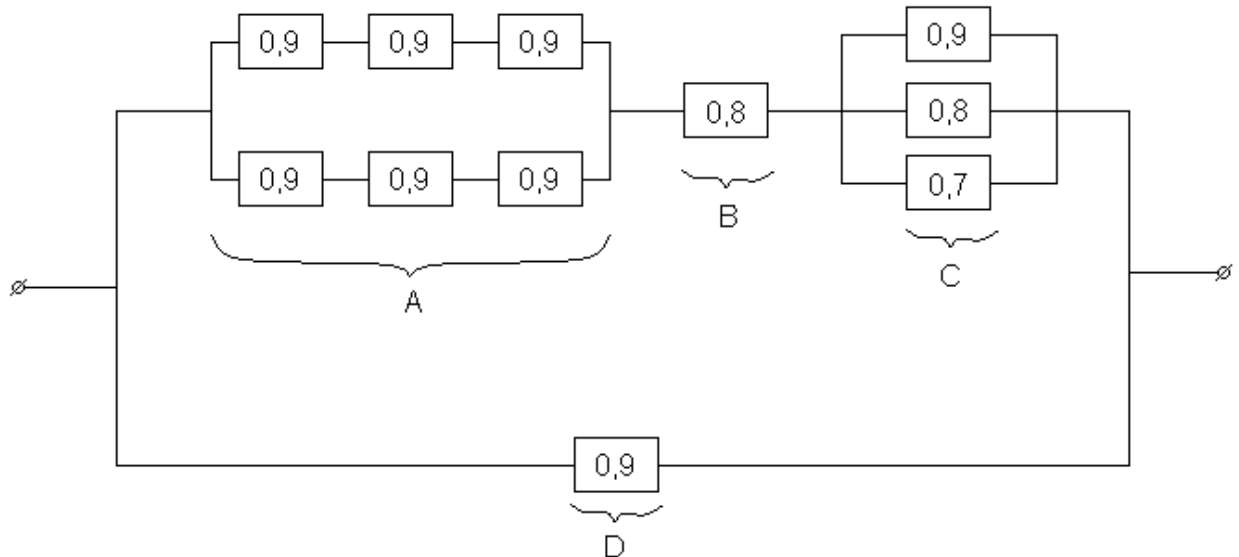


Рисунок 24 – Структурно-логическая комбинированная схема расчёта надёжности

Расчёт ведётся поэтапно.

1. Определяем надёжность блока А для параллельно-последовательной схемы с одинаковой вероятностью безотказности элементов,

$$P_A = 1 - (1 - P^n)^m = 1 - (1 - 0,9^3)^2 \approx 0,93.$$

2. Блок В нерезервируемый с вероятностью $P_B = 0,8$.

3. Вероятность безотказной работы блока С с параллельной схемой соединения элементов, $P_C = 1 - \prod_{j=1}^m (1 - P_j) = 1 - (1 - 0,9)(1 - 0,8)(1 - 0,7) \approx 0,994$.

4. Вероятность безотказной работы последовательной цепочки АВС,

$$P_{ABC} = \prod_{i=1}^n P_i = 0,93 \cdot 0,8 \cdot 0,994 = 0,74.$$

5. Вероятность безотказной работы всей резервируемой параллельно-соединённой системы

$$P_{сис} = 1 - (1 - P_{ABC})(1 - P_D) = 1 - (1 - 0,74)(1 - 0,9) = 0,974.$$

6.4 Сложные расчётные схемы надёжности

Сложные структурно-логические расчётные схемы надёжности нельзя идентифицировать ни с параллельными, ни с последовательными схемами. Поэтому стандартные приёмы, приведённые выше, для оценки надёжности неприемлемы. В этом случае используются методы вероятностного анализа всех возможных

взаимоисключающих способов появления отказов в системе. Для расчёта невозстанавливаемых систем при сложном соединении элементов и произвольном законе распределения наработки их до отказа используется несколько методов: перебора состояний; разложения относительно особого элемента; минимальных путей и сечений; логико-вероятностный и другие методы. Наиболее простым примером системы является так называемая мостиковая схема. Методы расчёта сложных схем рассматриваются в специальной литературе, и смотри В.В. Севриков «Практикум».

Лекция 10

7. ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЁЖНОСТИ ВОССТАНАВЛИВАЕМЫХ НЕРЕЗЕРВИРОВАННЫХ СИСТЕМ

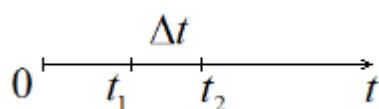
7.1 Потоки отказов и восстановлений работоспособности систем

Повышение надёжности технических объектов (систем) можно получить двумя путями: резервированием элементов системы (о чём шла речь выше), и восстановлением работоспособности системы после отказа её элементов. В последнем случае система должна обладать свойством ремонтпригодности. Также системы чаще всего не резервируются, и только в особых, наиболее ответственных случаях, дублируются или резервируются её отдельные элементы.

Для восстанавливаемых систем характерны случайные потоки отказов работоспособности, во времени t_0 и восстановлении t_6 , соответственно, с интенсивностями λ_0 и λ_6 . Эти потоки обладают особыми свойствами, или им можно приписать эти свойства, с допустимой погрешностью с тем условием, чтобы выбрать известный математический аппарат для оценки показателей надёжности.

Наиболее удобен для аналитических оценок простейший поток, который характеризуется:

1. *Стационарностью* отказов, так как $\lambda = const$.
2. Отсутствием *последствия*, т.е. если происходит случайное событие, например, отказ в некоторый момент времени t , не вызывающий отказа в другие моменты, то отказы не зависимы между собой.
3. Наличием *ординарности*, т.е. вероятности того, что на интервале времени Δt возникнет событие, например, отказ, во много раз большей чем вероятность возникновения двух и более событий. Вероятность попадания величины в интервал Δt зависит от размера этого интервала, а не от того, с какого места начат его отсчёт.



Поток отказов работоспособности системы и её восстановления с отмеченными свойствами является простейшим стационарным, и он описывается выражением закона Пуассона

$$P(K) = \frac{\lambda t^K}{K!} e^{-\lambda t} \text{ — дискретное распределение, время безотказной работы и время}$$

восстановления подчиняется экспоненциальному закону.

$$P(t) = e^{-\lambda t} \text{ — непрерывное распределение.}$$

Физическое понимание параметров выражения закона Пуассона, которым описывается простейший стационарный поток, приведено на рисунке 25.

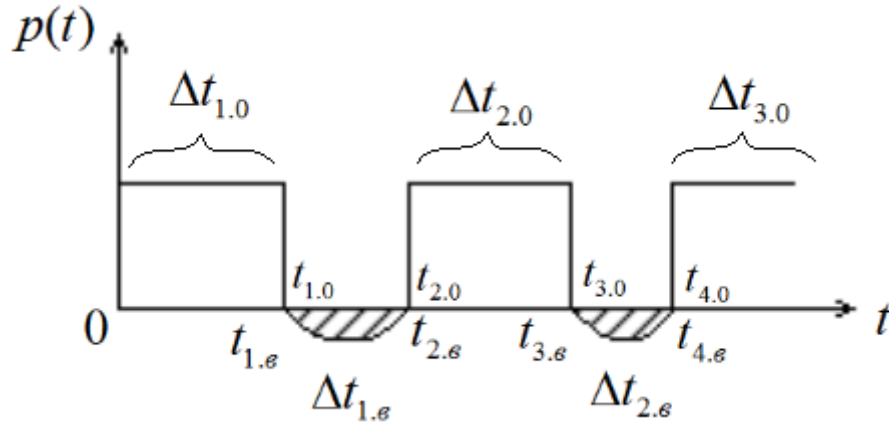


Рисунок 25 – Графическое отображение простейшего потока

7.2 Марковский случайный процесс

Потоки отказов и восстановлений формируют состояние S системы и её элементов (подсистем, модулей, блоков, узлов).

Системы (объекты) и их элементы при их функционировании переходят из одного состояния в другие состояния. Для расчёта показателей надёжности применяются различные методы, выбор которых определяется стандартом ГОСТ 27.301-95 и его Приложением. Основными методами расчёта являются *структурные*.

В качестве структурных схем расчёта показателей надёжности при разработке и проектировании объектов применяются графы (диаграммы) состояний и переходов, описывающих возможные состояния объекта и его переходы из одного состояния в другое в виде совокупности состояний и переходов его элементов.

Для математического описания графа переходов состояний резервированных последовательных структур с восстановлением и произвольными способами резервирования элементов систем, а также невозстанавливаемых систем с различными способами резервирования и при экспоненциальном распределении наработок до отказа элементов широко применяются *Марковские модели*.

Графы состояний объектов (систем), при допущении того, что поток событий (процессов) случайный во времени является пуассоновским, и время безотказной работы, а также время восстановления элементов подчиняется экспоненциальному закону, описывается аппаратом *Марковского процесса*.

Рассматривая этот процесс, например, применительно к износу элемента системы во времени t , то он является случайным и он реализуется по кривым, представленным на рисунке 26.

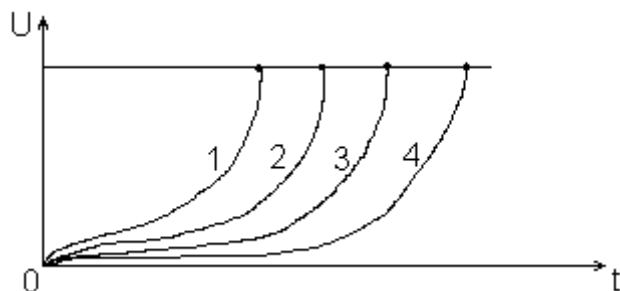


Рисунок 26 – Кривые процесса изнашивания элементов во времени

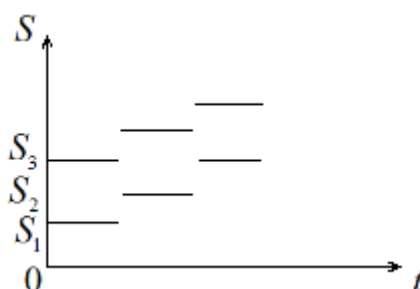


Рисунок 27 – График перехода состояний системы

Согласно графику (рис. 27) система из состояния S_1 переходит в состояние S_2 , из S_2 в состояние S_3 , из S_3 в состояние S_4 и т.д.

При Марковском процессе состояния системы описываются системой дифференциальных уравнений.

7.3 Типовые графы состояния функционирования системы

Рассмотрим возможные виды графов на примере автоматической системы экологического мониторинга, состоящую из трёх элементов (модулей, подсистем): поста контроля ПК параметров окружающей среды; канала связи КС, центральной ЭВМ. Схема системы АСКОС представлена на рис. 28.

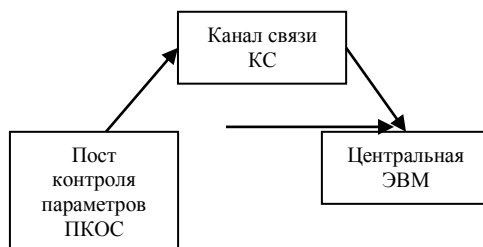


Рисунок 28 – Структура АСКОС

Восстанавливаемая, нерезервированная система. Отказ одного из элементов приводит к отказу всей системы экологического мониторинга. Изобразим функционирование данной системы с помощью *теории графов* (рис. 29):

- S_0 – состояние безотказной работы АСКОС.
- S_1 – состояние поста контроля после отказа;
- S_2 – состояние канала связи после отказа;
- S_3 – состояние центральной ЭВМ после отказа.

Система из состояния S_0 переходит в состояние S_1 с некоторым параметром λ_{01} (интенсивность отказов), а из S_1 в S_0 с параметром μ_{10} и в другие состояния.

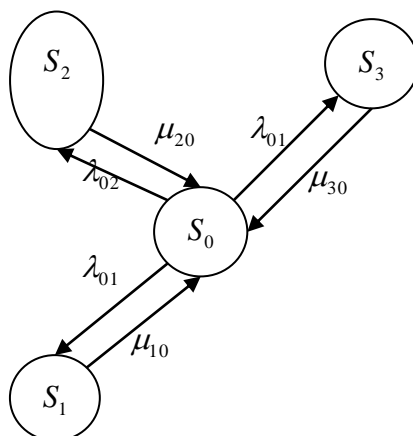


Рисунок 29 – Размеченный граф состояния системы

- λ – интенсивность отказов;
- μ – интенсивность восстановления.

1. Граф *гибели* невозстанавливаемой системы показан на рисунке 30.

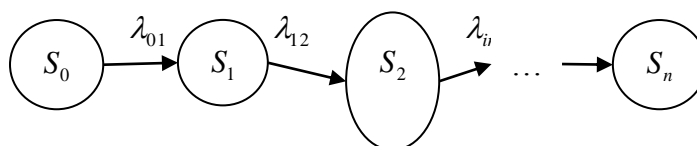


Рисунок 30 – Схема графа гибели

Системы из работоспособного состояния S_0 переходят в неработоспособное состояние при последовательном отказе элементов (рис. 31).

2. Граф *гибели* и *размножения* системы

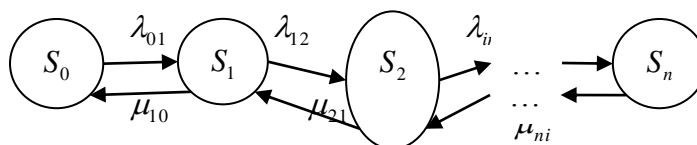


Рисунок 31 – Схема графа гибели и размножения

S_n – состояние полного отказа, когда отказали основной и все резервные элементы;

S_0 – безотказное состояние;

S_1 – отказал основной элемент, а 1-ый резервный работает;

S_2 – отказал основной и 1-ый резервный, а работает 2-ой элемент.

Графы гибели характеризуют состояния резервированных, невозстанавливаемых систем.

Графы гибели и размножения характеризуют состояния резервированных восстанавливаемых систем.

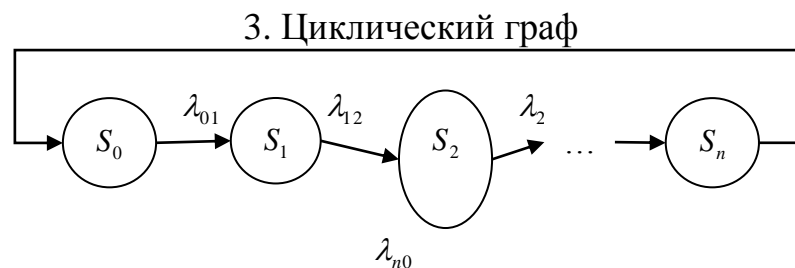


Рисунок 32 – Схема циклического графа

Через n шагов система переходит из одного состояния в другое. Она может прийти в начальное состояние, или в состояние функционирования после ремонта и т.д.

Выводы:

1. Процесс перехода состояний пошаговый.
2. Состояние системы дискретно.
3. Время перехода системы из одного состояния в другое распределено экспоненциально.

Приведённые графы, при допущении, что поток событий — Пуассоновский, и время безотказной работы, а также время восстановления описаны экспоненциальным законом — это Марковские процессы.

Лекция 11

8. МАТЕМАТИЧЕСКИЙ АППАРАТ ГРАФОВ СОСТОЯНИЯ СИСТЕМ

Для примера принимаем граф (рис. 33) восстанавливаемой нерезервируемой системы экологического мониторинга СЭМ. В этом случае оцениваются стандартные показатели надёжности: вероятность безотказной работы $P(t)$, коэффициент готовности K_2 , либо коэффициент оперативной готовности.

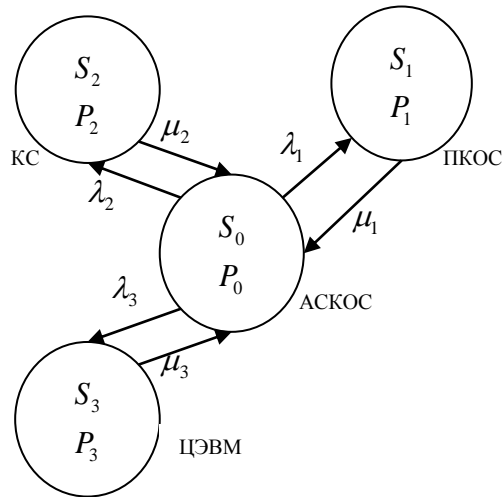


Рисунок 33 – Графическое представление АСКОС

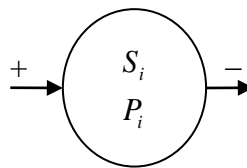
Вероятность нахождения системы в данном состоянии описывается Марковской моделью по схеме:

$$S_0 \rightarrow P_0; \quad S_2 \rightarrow P_2;$$

$$S_1 \rightarrow P_1; \quad S_3 \rightarrow P_3.$$

Вероятность изменения этого состояния S_0 за малый промежуток времени $(dt) \rightarrow 0$ описывается дифференциальным уравнением вида:

$$\frac{dP_0}{dt} = -\lambda_1 P_0 + \mu_1 P_1 - \lambda_2 P_0 + \mu_2 P_2 - \lambda_3 P_0 + \mu_3 P_3,$$



где $\lambda_i P_i$ – выражения состояний.

Вероятность P_i состояния элементов S_i описывается системой аналогичных дифференциальных уравнений:

$$S_1 \left\{ \begin{array}{l} \frac{dP_1}{dt} = -\mu_1 P_1 + \lambda_1 P_0 \\ \frac{dP_2}{dt} = -\mu_2 P_2 + \lambda_2 P_0 \\ \frac{dP_3}{dt} = -\mu_3 P_3 + \lambda_3 P_0. \end{array} \right.$$

Для решения этой системы необходимо знать значения интенсивностей отказов λ_i и восстановлений μ_i , которые определяются опытным путём.

Если же система функционирует продолжительное время $(t \rightarrow \infty)$, тогда она принимает вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dP_0}{dt} = 0; \\ 0 = -\mu_i P_i + \lambda_i P_0; \end{array} \right.$$

$$P_i = \frac{\lambda_i}{\mu_i} P_0.$$

Это система дифференциальных уравнений Колмогорова для графа состояний последовательных элементов. Она трансформируется в систему простых алгебраических уравнений:

$$\begin{cases} S_0 & \left\{ \begin{aligned} P_0(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3) &= P_1\mu_1 + P_2\mu_2 + P_3\mu_3 \\ S_1 & \left\{ \begin{aligned} P_1\mu_1 &= P_0\lambda_1 \\ S_2 & \left\{ \begin{aligned} P_2\mu_2 &= P_0\lambda_2 \\ S_3 & \left\{ \begin{aligned} P_3\mu_3 &= P_0\lambda_3. \end{aligned} \end{aligned} \end{aligned} \end{aligned} \end{aligned} \end{aligned} \end{aligned}$$

Решение этой системы достигается путём нормирования $P_0 + P_1 + P_2 + P_3 = 1$.

Тогда можно записать:

$$\begin{cases} P_1 = P_0\lambda_1 / \mu_1 \\ P_2 = P_0\lambda_2 / \mu_2 \\ P_3 = P_0\lambda_3 / \mu_3. \end{cases}$$

Решив систему алгебраических уравнений, определяем P_0 , которое является коэффициентом готовности K_2 :

$$P_0 = K_2 = \left(1 + \frac{\lambda_1}{\mu_1} + \frac{\lambda_2}{\mu_2} + \frac{\lambda_3}{\mu_3} \right)^{-1} \quad \text{— это есть уравнение надёжности}$$

восстанавливаемых нерезервированных систем в стационарном режиме.

Восстановление — есть рациональный путь, как и резервирование, повышения надёжности (K_2) системы, $K_2 = \frac{T_p}{T_p + T_n}$.

Определив K_2 , можно найти коэффициент простоя $K_n = 1 - K_2$. Уменьшая время простоя, увеличиваем K_2 .

Для невосстанавливаемых резервируемых систем имеются нижеследующие расчётные выражения ПН.

1. Для *ненагруженной системы*, вероятность безотказной работы резервированной системы

$$P(t) = e^{-\lambda_0 t} \sum_{i=0}^m \frac{(\lambda_0 t)^i}{i!}, \text{ при } \lambda_1 < \lambda_0,$$

где $T_{pez} = \frac{m+1}{\lambda_0}$ — среднее время безотказной работы резервированной системы;

λ_0 — интенсивность отказов нерезервированной системы;

m — кратность резервирования;

i — число резервных элементов.

2. Для *нагруженного резервирования*:

$$T_{pez} = \frac{1}{\lambda_0} \sum_{i=0}^m \frac{1}{1+i} \text{ при } \lambda_1 > \lambda_0;$$

$$P(t) = 1 - (1 - e^{-\lambda_0 t})^{m+1}.$$

3. Для системы с *облегченным резервом*:

$$T_{рез} = \frac{1}{\lambda_0} \sum_{i=0}^m \frac{1}{1+ik} \text{ при } \lambda_0 = \lambda_1,$$

где k – коэффициент, который показывает насколько резервный элемент разгружен по отношению к основному,

$$k = \frac{\lambda_1}{\lambda_0}.$$

Лекция 12

9. НАДЁЖНОСТЬ СИСТЕМЫ БЕЗОПАСНОСТИ

9.1 Особенности надёжности систем безопасности

Технические системы безопасности должны быть высоконадёжными и по включению в действие автоматическими или автоматизированными. Последние получили название *эргатические*. Очевидно, что уровень надёжности систем безопасности должен определяться из приемлемого риска гибели людей. Однако научной обоснованности приемлемого риска не имеется. В Европе, России, а теперь и в Украине максимально приемлемым уровнем индивидуального риска гибели людей принято значение 10^{-6} , т.е. гибель одного человека в год из одного миллиона человек.

Индивидуальный риск фатального исхода в год Q , обусловленный различными причинами. По данным, относящимся ко всему населению США изменяется от $3 \cdot 10^{-4}$ на автомобильном транспорте, $4 \cdot 10^{-5}$ на пожарах, $6 \cdot 10^{-6}$ при поражении электрическим током до $2 \cdot 10^{-10}$ при поражении ядерной энергией. В научных кругах до сих пор обсуждается вопрос приемлемого риска и предлагается принимать его равным 10^{-5} и даже 10^{-4} , исходя из того, что фактический риск на два-три порядка выше приемлемого 10^{-6} . Исходя из этого, в некоторых отраслях имеются ведомственные нормативные значения надёжности для некоторых средств защиты по вероятности их безотказной работы $P(t) = 1 - Q(t) = 0,99995 \dots 0,0095$ при разбросе значений риска $Q(t)$ от 10^{-6} до 10^{-4} . Например, системы защиты атомных реакторов должны иметь вероятность отказа за год, не превышающую $Q(t) = 10^{-6}$, системы управления $Q(t) = 10^{-5}$.

Жестокость требований начинается ещё на этапах разработки и проектирования. Целесообразно рассматривать системы безопасности как системы с основным (последовательным соединением). Эти системы являются восстанавливаемыми.

Оценка надёжности $R(t)$ систем безопасности проводится по выражению

$$R(t) = \prod_{j=1}^m P_j(t), \text{ где}$$

$P_j(t)$ – вероятность безотказной работы по составляющим надёжности;

$\prod_{j=1}^m$ – произведение независимых событий.

Основными составляющими надёжности систем безопасности являются:

1. Структурно-функциональная СФН;
2. Параметро-точностная ПТН;
3. Эксплуатационно-прочностная ЭПН.

Структурно-функциональная надёжность — это надёжность функционирования системы безопасности, обусловленная её структурой и функциями элементов. Эта надёжность важна на этапах разработки и проектирования системы. При этом принимаются все отказы как функциональные и внезапные.

Параметро-точностная надёжность — надёжность системы, обусловленная тем, что в течении заданного времени ни один из параметров, в том числе параметры точности, характеризующие выполнение системой основной задачи, будут находиться в заданных пределах, т.е. не выходя за установленные допуски или нормированные значения. ПТН важна для систем контроля.

Эксплуатационно-прочностная надёжность — надёжность функционирования системы на этапе её эксплуатации, обусловленная приспособленностью системы к проведению эксплуатационного обслуживания в течении заданного времени её эксплуатации.

9.2 Особенности функционирования систем безопасности. Структурно-функциональная надёжность

Типовые элементы в системах безопасности (модули подсистемы) показаны на рисунке 34.

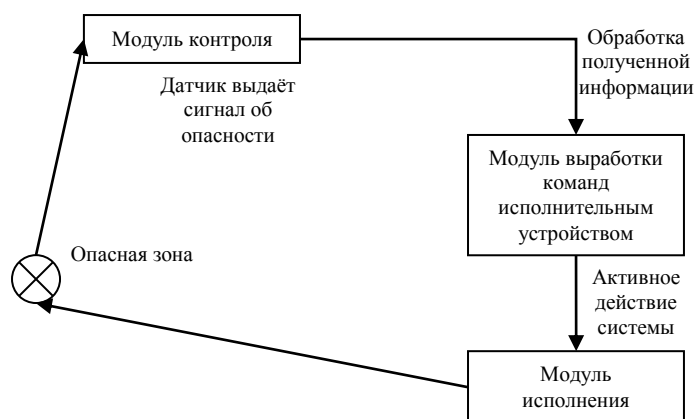


Рисунок 34 – Модульная структура системы

Системы имеют сложный режим функционирования. Он состоит из нескольких режимов:

1. Режим ожидания (S_0);
2. Режим подготовки к применению;
3. Режим исполнения (действия).

Сложный режим функционирования системы безопасности отражён на рисунке 35 в виде графа состояний:

S_0 – наиболее длительный режим; (система анализирует вектор параметров состояния среды);

S_1 – режим подготовки системы к применению (переходный режим, быстротечный во времени);

S_2 – режим исполнения, действие системы (скоротечный, тяжело нагруженный).

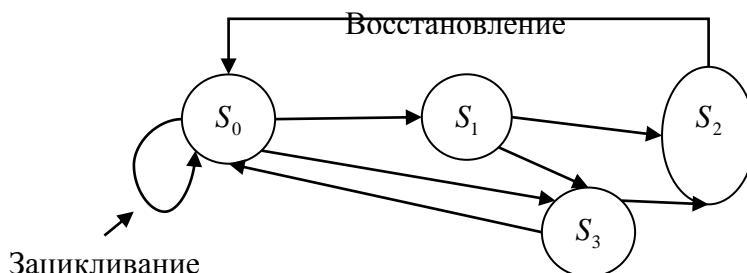


Рисунок 35 – Граф состояний системы безопасности:

состояние S_0 характеризует СФН;

состояния S_1 и S_2 характеризуют ПТН;

состояние S_3 характеризует ЭПН.

У систем безопасности (например, системы пожаротушения) режим S_2 самый нагруженный.

После S_2 необходимо провести восстановление системы, чтобы она вновь перешла в состояние ожидания и контроля.

Однако система может в любое время перейти в состояние отказа S_3 , т.е. в состояние восстановления (ремонта), после которого система переходит в состояние S_0 .

Может возникнуть состояние *заикливания*, когда система не может выйти из состояния S_0 . В этом случае возникает необходимость профилактики системы. Режим S_0 хорошо описывается аппаратом Марковского случайного процесса, при котором оценка надёжности выполняется по внезапным отказам, подчиняющимся экспоненциальному распределению.

Часто элементы в режиме S_2 резервируются.

На ранних этапах проектирования для режима S_0 оценивается СФН, о которой до сих пор шла речь.

Для режима S_2 систем контроля оценивается ПТН. Эта составляющая надёжности является важнейшей для экологических и производственных систем контроля.

Особого внимания заслуживает вопрос оценки надёжности систем пожаротушения, которые относятся к большим (сложным) системам и, которые распространены практически в большинстве отраслей хозяйственной и специальных

видов деятельности человека. В наиболее опасных условиях регламентировано применение автоматических установок пожаротушения (АУП). Они функционируют в двух режимах: дежурном (ожидания опасной ситуации) и исполнения (действия по ликвидации опасной ситуации).

К сожалению, в настоящее время нет практических методик оценки расчетным путем надежности АУП и систем взрывоподавления (СВП) при их проектировании. Отсутствуют не только методики, но и методология расчета надежности, которая бы учитывала два важнейших, выше отмеченных, режима функционирования АУП и СВП и их переходные состояния в результате отказов и восстановлений работоспособности элементов.

При проектировании подобных изделий целесообразно оценивать структурную надежность по надежности отдельных элементов, выполнив их структурную декомпозицию, например, для АУП пенного тушения загораний на элементы:

- 1 – подсистему пожарной сигнализации (УТПС);
- 2 – собственно установку тушения загорания (УТЗ);
- 3 – огнетушащее вещество (ВО).

Данная установка относится к сложным динамическим восстанавливаемым нерезервируемым системам, находящаяся в конкретные периоды времени в детерминированном состоянии и способная переходить в стохастическое состояние в результате отказов отдельных элементов с последующим восстановлением их работоспособности.

Для таких систем характерны случайные потоки отказов работоспособности во времени t_o и восстановлении t_e , соответственно, с интенсивностями λ_{oi} и μ_{ei} в режиме ожидания (дежурном), и λ'_{oi} и μ'_{ei} в режиме исполнения (тушения). Эти потоки обладают, или им можно приписать с допустимой погрешностью такие свойства, которые позволяют использовать известный математический аппарат для оценки надежности. Наиболее удобен для этой цели простейший поток, обладающий следующими свойствами: стационарностью, при которой λ и μ постоянны; отсутствием последействия; наличием ординарности.

В качестве структурных схем расчета показателей надежности используются графы состояний и переходов. Для математического описания этих графов широко применяются Марковские модели в виде систем дифференциальных уравнений.

Для принятой АУП с трехэлементной ее декомпозицией, следуя математическому аппарату, изложенному выше (Лекция 11), теоретическое выражение полной надежности по стандартным показателям коэффициента готовности K_2 и коэффициента оперативной готовности K_{o2} в виде вероятности безотказности в режимах ожидания $P(t_{ож})$ и исполнения $P(t_{ис})$, можно записать в следующем виде:

$$P(t)_c = P(t_{ож}) \times P(t_{ис});$$

$$P_c = \left(1 + \frac{\lambda_{o1}}{\mu_{e1}} + \frac{\lambda_{o2}}{\mu_{e2}} + \frac{\lambda_{o3}}{\mu_{e3}}\right) \times \left(1 + \frac{\lambda'_{o1}}{\mu'_{e1}} + \frac{\lambda'_{o2}}{\mu'_{e2}} + \frac{\lambda'_{o3}}{\mu'_{e3}}\right)^{-1}.$$

Однако данное выражение пока что не имеет практического смысла из-за отсутствия в настоящее время самотестирующихся АУП, т.е. которые бы в режиме тушения при возникновении отказов элементов восстанавливали бы их работоспособность. Поэтому приведенное выражение имеет только теоретическое

значение. В настоящее время делаются попытки создания самотестируемых установок пожаротушения, что не исключает наличие таких установок в будущем.

Если правый множитель выразить статистической оценкой по данным полученных испытаний АУП или данным журналов по их состоянию, которые ведутся на объектах, оборудованных этими установками, то теоретическое выражение полной надежности имеет вид:

$$P_c = \left(1 + \frac{\lambda_{o1}}{\mu_{o1}} + \frac{\lambda_{o2}}{\mu_{o2}} + \frac{\lambda_{o3}}{\mu_{o3}}\right)^{-1} \times \frac{N-n}{N},$$

где N – общее число испытаний в режиме исполнения (тушения);

n – число отказов (нетушений) за время испытаний.

В этом случае последнее выражение приобретает практический смысл.

Оценка интенсивности потоков отказов λ и восстановлений μ может быть произведена по статистическим данным или данным испытаний по среднему времени безотказности $T = \sum_{i=1}^n t_i$ и среднему времени восстановления

работоспособности установки (элемента) $T_e = \sum_{i=1}^{n_e} t_{ie}$. В этом случае, с учетом

экспоненциального распределения показателей надежности $\lambda_o = \frac{1}{T}$ и $\mu_e = \frac{1}{T_e}$.

9.3 Общий подход к оценке параметро-точной надежности

Оценка ведётся по трём направлениям:

- по силовому (массовому) критерию $N(t), M(t)$
- по масштабному критерию $S(t)$
- по временному критерию $T(t)$

Пусть $y_i = N(t)$ или $S(t)$ или $T(t)$;

$$A_i \leq y_i \leq A_{2i},$$

где y_i – i -ый параметр данного критерия находится в интервале $(A_i; A_{2i})$.

$$y_{1i} - \Delta_i \leq y_i \leq y_{2i} + \Delta_i,$$

где Δ_i – погрешность измерения параметров.

Вероятность безотказной работы по одному из критериев:

$$P_{N,S,T}(t) = 1 - \prod_{i=1}^n F_i, \text{ где } F_i \text{ – функция распределения параметра.}$$

Выход из действия одного из критериев рассматривается как отказ системы.

Отказ по силовому (массовому) фактору — когда при переходе из режима контроля в режим исполнения система подала в зону горения, например, меньшее количество огнетушащего вещества.

Отказ по масштабному показателю — когда система подала нужное количество огнетушащего вещества, но не на заданную защищаемую площадь или объём.

Отказ по временному показателю — когда система производила тушение меньшее количество времени, чем требуется для полной ликвидации пожара, или

вступила в действие с запозданием и пожар к этому времени получил большие размеры, чем предполагалось.

Вероятность безотказной работы системы по критериям (показателям) может быть определена по результатам полигонных испытаний:

По $N(t)$ или $M(t)$

$$P_{N,M}(t) = \frac{n_{N,M}(t)}{m},$$

m – общее число систем (элементов, устройств) безопасности, поставленных на испытание ;

$n_{N,M}$ – число систем, безотказно сработавших по силовому фактору к моменту времени t испытаний.

По $S(t)$ или $V(t)$

$$P_{S,V}(t) = \frac{n_{S,V}(t)}{m}.$$

9.4 Оценка эксплуатационно-прочностной составляющей надёжности

Вероятность безотказной работы средства безопасности определяется по квантили нормального распределения расчётного параметра. Исходным выражением является

$$\bar{y} - \bar{y}_{\text{lim}} = U_p S, \text{ где}$$

\bar{y} – среднее значение некоторого расчётного параметра, характеризующего заданные критерии ЭПН (например, критерии прочности, износостойкости, теплостойкости);

\bar{y}_{lim} – среднее значение предельной величины рассматриваемого критерия (часто выбирается по справочнику, например, допустимое напряжение на разрыв $[\sigma_p]$);

U_p – квантиль нормированного нормального распределения, т.е. функции от вероятности безотказной работы.

S – среднее квадратическое отклонение (СКО) двух случайных величин S_y и $S_{y_{\text{lim}}}$, определяемое по формуле

$$S = \sqrt{S_y^2 + S_{y_{\text{lim}}}^2}, \text{ где}$$

S_y и $S_{y_{\text{lim}}}$ – соответственно СКО двух случайных величин y и y_{lim} .

Выражение квантили имеет вид

$$U_p = \frac{\bar{y} - \bar{y}_{\text{lim}}}{S_y^2 + S_{y_{\text{lim}}}^2}.$$

При таком подходе определяются основные критерии ЭПН.

Зная U_p по таблицам нормального распределения находится вероятность $P(t)$ безотказной работы устройства по его лимитирующим параметрам. Например, по критерию прочности на разрыв,

$$U_p = \frac{\bar{\sigma}_{\text{lim}} - \bar{\sigma}_a}{\sqrt{S_\sigma^2 + S_{\sigma_{\text{lim}}}^2}}, \text{ где}$$

σ_{lim} – предельное напряжение на разрыв, превышение которого вызывает разрушение рассматриваемого элемента устройства, МПа;

σ_a – расчётное напряжение.

Если $\bar{y} - \bar{y}_{\text{lim}} = U_p S = 0$, то вероятность безотказной работы равна 50% или 0,5, т.е. равна квантилю U_p .

Важнейшее значение для обеспечения ЭПН имеет *профилактическое обслуживание*.

Лекция 13

10. ПРОФИЛАКТИЧЕСКОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ

Часто для систем безопасности используют три вида профобслуживания:

1. Регламентное;
2. Календарное;
3. Комбинированное (регламентное и календарное).

10.1 Регламентное профобслуживание

Обслуживание системы проводится, когда один или несколько контролируемых параметров изделия достигает некоторого предельного значения. Этот вид профобслуживания применяется тогда, когда известна связь между работоспособностью системы и изменением её основных параметров.

Пример.

Обслуживающий персонал контролирует изменение состояния параметров системы. Графически этот процесс представлен на рисунке 36.

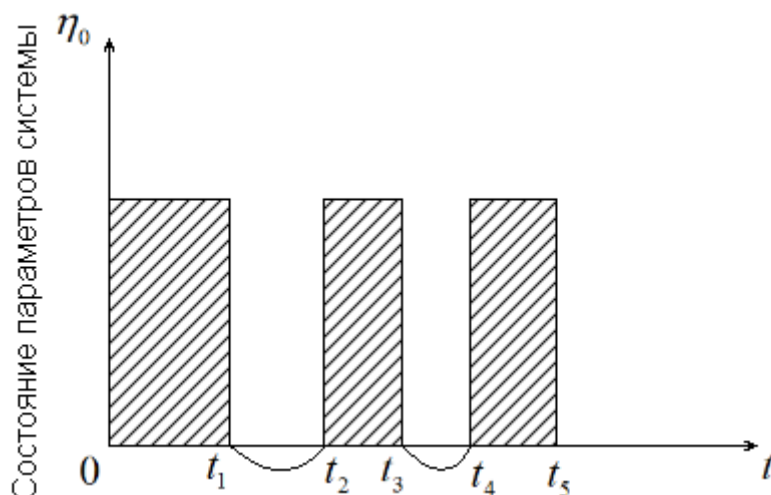


Рисунок 36 – Процесс регламентного обслуживания во времени

Как только один из параметров системы выходит за предельные значения, то проводится профобслуживание системы.

На рисунке обозначено:

t_1, t_3 – время начала обслуживания;

t_2, t_4 – время окончания профобслуживания.

Заштрихованные интервалы – время нормального рабочего функционирования.

10.2 Календарное обслуживание

Сроки обслуживания устанавливаются независимо от состояния параметров функционирования изделия (рис. 37).

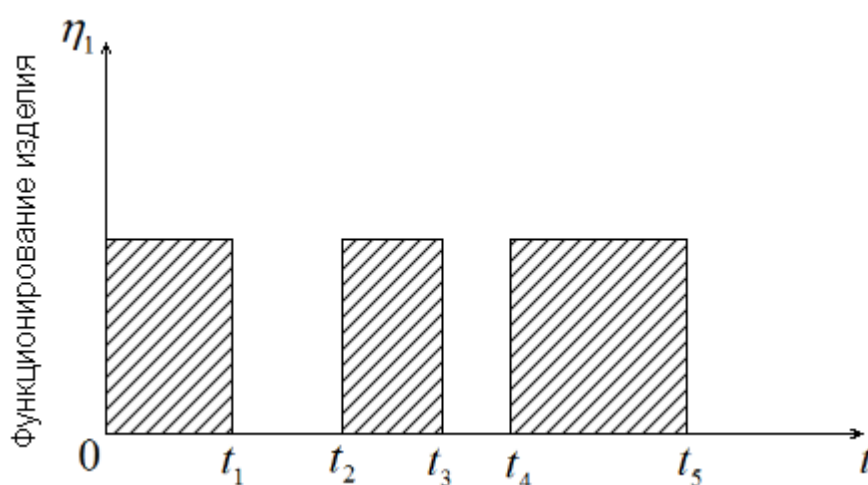


Рисунок 37 – Процесс календарного обслуживания

10.3 Смешанное (комбинированное) обслуживание

Комбинированное — это совмещённое регламентное и календарное обслуживание, показанное на рисунке 38.

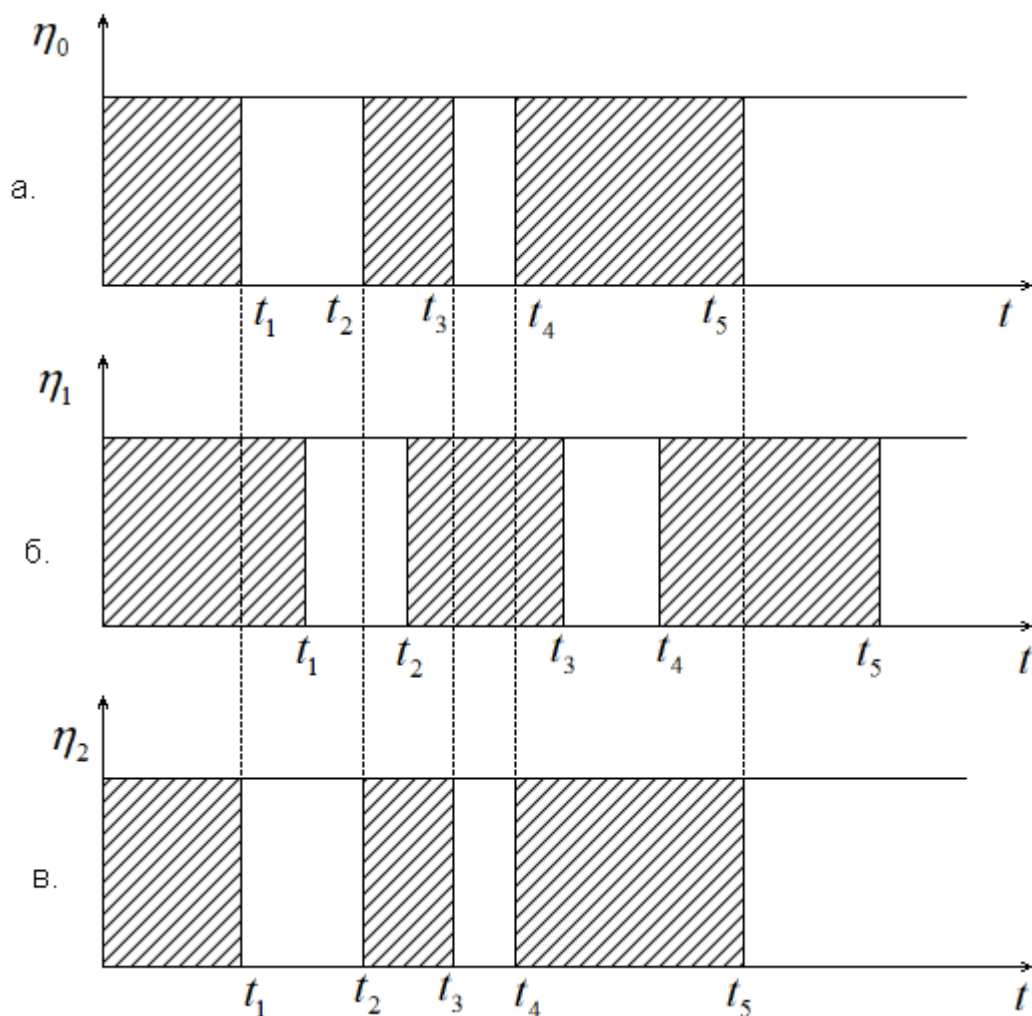


Рисунок 38 – Комбинированное обслуживание объекта

Графическое отображение, как результата, регламентного, календарного и комбинированного обслуживания представлено на рисунке 38, в.

Лекция 14

11. НАЗНАЧЕНИЕ ТРЕБОВАНИЙ ПО НАДЁЖНОСТИ. ВЫБОР ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЁЖНОСТИ

11.1 Назначение требований

При назначении требований по надёжности учитываются и согласовываются между потребителем и изготовителем нижеследующие вопросы:

1. Типовая модель эксплуатации объекта.
2. Критерии отказов по выбранной модели объекта.
3. Номенклатуру и значение показателей надёжности применительно к данной модели эксплуатации объекта.
4. Методы контроля соответствия объекта требованиям надёжности.
5. Требования и ограничения по конструктивным, технологическим или эксплуатационным способам обеспечения надёжности.

6. Согласовываются необходимость разработки комплексной программы обеспечения заданного уровня надёжности объекта.

11.2 Выбор номенклатуры используемых показателей надёжности

Номенклатура показателей надёжности выбирается в соответствии со стандартом ГОСТ 27.002-90 по нижеследующим свойствам и особенностям объекта (системы):

1. Определённость назначения данного объекта, изделия системы.

Группы объектов и изделий:

- 1.1 Изделия конкретного назначения ИКН;
- 1.2 Изделия общего назначения ИОН.

В отличие от ИОН, ИКН имеют один основной вариант применения их по назначению.

2. По числу возможных конкретных состояний. Все объекты делятся на две группы: вида I и вида II.

Изделия вида I — это изделия (объекты), которые могут находиться в чётко различаемых 2-х состояниях: работоспособном и неработоспособном. Если нельзя чётко определить работоспособное или неработоспособное состояние, то такие изделия относятся к группе II (промежуточное состояние).

3. Режим применения (режим функционирования). Все объекты по режиму применения делятся на 3 группы:

1. Непрерывно-длительного применения;
2. Многократно-циклического применения;
3. Однократного применения.

4. По последствиям отказов выделяют виды изделий:

1. Отказ которых приводит к последствиям катастрофического характера (опасность для жизни человека, ущерб окружающей природной среде (ОПС)).

2. Отказ которых не приводит к катастрофическим последствиям; согласно межгосударственному стандарту 27.310-95 предусматривается шкала для установления категорий тяжести последствий отказов. Таких категорий четыре:

1. Отказ, который может повлечь снижение качества функционирования объекта, но не представляет опасности для человека, ОПС и самой технической системы.

2. Отказы, которые могут повлечь задержку выполнения задачи или снижения эффективности системы, но не представляют опасности для человека, ОПС и самого объекта.

3. Отказы, которые могут повлечь значительный ущерб для самого объекта или ОПС, но риск для человека пренебрежительно мал;

4. Отказы, которые могут повлечь катастрофический ущерб ОПС, гибель или травмирование людей и т.п.

5. По возможности восстановления объекты делятся на:

- восстанавливаемые;
- невосстанавливаемые.

6. По характеру основных процессов, которые будут определять переход объекта в предельное состояние, все объекты делятся на:

- 1) стареющие;
- 2) изнашиваемые;
- 3) стареющие и изнашиваемые одновременно..

7. По возможности и способу восстановления ресурса объекта (сроку службы).

Объекты, в которых восстановление ресурса достигается проведением плановых ремонтов:

- 1) неремонтируемые;
- 2) ремонтируемые.

Ремонтируемые подразделяются на:

- 1) обезличенным способом;
- 2) необезличенным способом.

Неремонтируемые — объекты, для которых плановые ремонты не предусматриваются.

8. По возможности проведения контроля работоспособности перед применением объекты делятся на:

- в которых контроль предусмотрен;
- контроль в которых не предусмотрен перед применением.

Учитывая данную классификацию технических объектов, конкретные показатели могут быть выбраны по справочным таблицам, приведённым в ГОСТ 27.002-90.

Пример 1. Пусть требуется выбрать показатели надёжности для технического объекта — полупроводниковый транзистор.

Решение. По классификации и справочным таблицам ГОСТа находим показатели надёжности транзистора по нижеследующим признакам:

- 1 – ИОН;
- 2 – вида I (т.к. это высоконадёжное комплектующее изделие межотраслевого применения);
- 3 – объект непрерывного длительного применения;
- 4 – объект не восстанавливаемый, объект не обслуживаемый;
- 5 – переход объекта в предельное состояние не приводит к катастрофическим последствиям;

б – изделие изнашиваемое и стареющее при хранении. По данным признакам необходимо выбрать следующие показатели надёжности:

- интенсивность отказов λ ;
- средний ресурс \bar{T}_p ;
- средний ресурс до списания ;
- средний срок хранения \bar{T}_{xp} .

Пример 2. ПЭВМ (персональная ЭВМ):

- 1) ИОН;
- 2) Вида I;
- 3) Непрерывного длительного применения;
- 4) Восстанавливаемое;
- 5) Переход в предельное состояние не приводит к катастрофическим последствиям;
- 6) Стареющее, длительно не хранимое.

Основные показатели надёжности:

- коэффициент технического использования K ;
- средняя наработка на отказ \bar{T}_o ;
- среднее время восстановления $\bar{T}_{вос.}$;

11.3 Критичность отказов

Согласно ГОСТ 27.310-95 критичность отказа определяется по формуле

$$C = B_1 \cdot B_2 \cdot B_3, \text{ где}$$

C – критичность отказа;

B_1 – оценка вероятности отказа по балльной шкале;

B_2 – оценка последствий отказа в баллах;

B_3 – оценка вероятности обнаружения отказа до поставки изделия потребителю.

В соответствующем стандарте приведены таблицы, по данным которых производится оценка величины C .

Для практически невероятного отказа вероятность отказа принимается равной 0,00005, для которого $B_1 = 1$.

Если отказ не приводит к заметным последствиям, то $B_2 = 1$.

Оценка B_3 для очень высокой вероятности поставки потребителю дефектного изделия (вероятность обнаружения отказа менее 0,25), тогда лежит в пределах от 9 до 10 баллов.

С учётом отмеченного $C = 1 \cdot 1 \cdot 9,5 = 9,5$ бал.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

Основная

1. Глазунов Л.П. Основы теории надёжности автоматических систем управления /Л.П. Глазунов, В.П. Гробовецкий, О.В. Щербаков. – Л.: Энергоатомиздат, 1984.-210с.

2. Козлов Б.А. Справочник по расчёту надёжности аппаратуры радиоэлектроники и автоматики /Б.А. Козлов, И.А. Ушаков. – М.: Советское радио, 1975.-472с.

3. Карпенко В.А. Приводы измерительных приборов и автоматов и их надёжность :учебное пособие для вузов/В.А. Карпенко, А.П. Васютенко, В.В. Севриков. – Киев-Севастополь: СевГТУ, Институт содержания и методов обучения, 1996.-256с.

Дополнительная

4. ГОСТ 27.002-89 Надёжность в технике. Основные понятия. Термины и определения.– М.: Госстандарт, 1990.

5. ГОСТ 27.003-90 Надёжность в технике. Состав, общие правила задания требований по надёжности. – М.: Госстандарт, 1991.

