Федеральное агентство по образованию
Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
Владимирский государственный университет
Кафедра автоматизации технологических процессов

ДИАГНОСТИКА И НАДЕЖНОСТЬ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ

Методические указания к практическим занятиям

В двух частях

Часть 1. Надежность автоматизированных систем

Владимир 2006

УДК 621.3.019.076
ББК 32.965-02
Д44

Составители:
А. А. Назаров, С. Ф. Аладышев, А. Н. Кирилина, Н. Г. Рассказчиков

Рецензент
Кандидат технических наук,
доцент кафедры управления качеством и технического
регулирования Владимирского государственного университета
М.В. Латышев

Печатается по решению редакционно-издательского совета
Владимирского государственного университета

Д44 **Диагностика** и надежность автоматизированных систем : метод. указания к практ. занятиям. В 2 ч. Ч. 1. Надежность автоматизированных систем / Владим. гос. ун-т, Каф. автоматизации технолог. процессов; сост. : А. А. Назаров С. Ф. Аладышев, А. Н. Кирилина, Н. Г. Рассказчиков ; – Владимир : Изд-во Владим. гос. ун-та, 2006. – 57 с.

Составлены в соответствии с программой курса «Диагностика и надежность автоматизированных систем» применительно к учебным планам, утвержденным в 1996 г. Предназначены для студентов специальностей 220301 и 220401 дневной и заочной форм обучения. Часть 1 содержит краткий теоретический материал по разделу «Надежность автоматизированных систем», задачи для практических занятий и примеры их решения.

Табл. 5. Ил. 16. Библиогр.: 9 назв.

УДК 621.3.019.076
ББК 32.965-02

ПРЕДИСЛОВИЕ

Наилучший метод изучения теории – решение практических задач. Практические занятия позволят студентам закрепить изученный теоретический материал по теории надежности, которая имеет большое практическое значение.

Для облегчения решения задач приведены основные сведения из теории, расчетные формулы, вспомогательные таблицы и графики, а также типовые примеры с решениями.

Методические указания содержат пять подразделов, включающих краткие сведения из теории надежности и расчетные формулы, типовые примеры с решениями и задачи. В отдельных случаях даны краткие указания, позволяющие студенту найти наиболее простой путь решения.

Цель методических указаний – помочь студенту изучить теорию надежности и приобрести навыки применения ее результатов к решению различных прикладных вопросов. Решение примеров, формулировка задач и описание способов их решения осуществлены по методикам, применяемым на промышленных предприятиях, в конструкторских бюро и научно-исследовательских работах.

В разделах задач для самостоятельного решения помещены как простые задачи, так и сложные, требующие углубленных знаний теории, решение которых будет способствовать выработке практических навыков.

1. КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАДЕЖНОСТИ

1.1. Критерии и количественные характеристики надежности

Критерием надежности назовем признак, мерило, по которому оценивается надежность различных изделий.

К числу наиболее широко применяемых критериев надежности относятся:

- вероятность безотказной работы в течение определенного времени $P(t)$;
- средняя наработка до первого отказа $T_{ср}$;
- наработка на отказ $t_{ср}$;
- частота отказов $a(t)$;
- интенсивность отказов $\lambda(t)$;
- параметр потока отказов $\omega(t)$;
- функция готовности $K_Г(t)$;
- коэффициент готовности $K_Г$.

Характеристикой надежности называется количественное значение критерия надежности конкретного изделия.

Выбор характеристик надежности зависит от вида изделия.

Основные критерии надежности можно разбить на две группы:

- критерии, характеризующие надежность невосстанавливаемых изделий;
- критерии, характеризующие надежность восстанавливаемых изделий.

Невосстанавливаемыми называются изделия, которые в процессе выполнения своих функций не допускают ремонта. Если происходит отказ такого изделия, то выполняемая операция будет сорвана и ее необходимо начинать вновь в том случае, если возможно устранение отказа. К таким изделиям относятся как изделия однократного действия (ракеты, управляемые снаряды, искусственные спутники Земли, усилители системы подводной межконтинентальной связи и т. п.), так и изделия многократного действия (некоторые системы навигационного комплекса судового оборудования, системы ПВО, управления воздушным движением, системы управления химическими, металлургическими и другими ответственными производственными процессами и т. д.).

Восстанавливаемыми называются такие изделия, которые в процессе выполнения своих функций допускают ремонт. Если произойдет отказ такого изделия, то он вызовет прекращение функционирования изделия только на период устранения отказа. К таким изделиям относятся: телевизор, агрегат питания, станок, автомобиль, трактор и т. п.

На рис. 1.1 представлен временной график работы невосстанавливаемых (*а*) и восстанавливаемых (*б*) изделий.

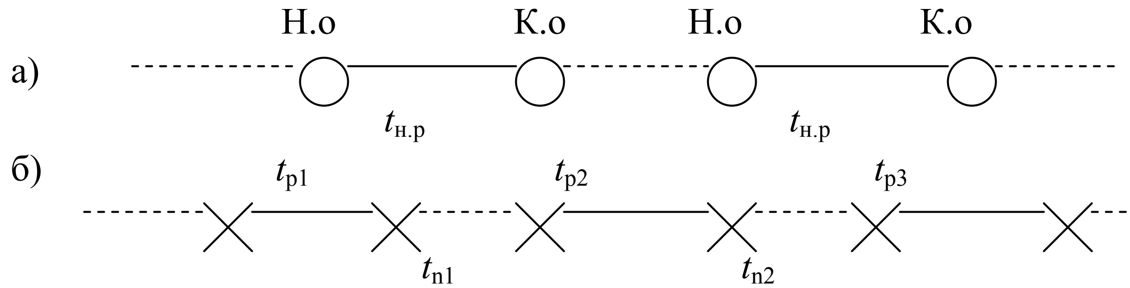


Рис. 1.1. Временной график работы невосстанавливаемых и восстанавливаемых изделий: а – изделия невосстанавливаемые ($t_{н.р}$ – время непрерывной работы, Н.о. – начало операции, К.о. – конец операции); б – изделия восстанавливаемые ($t_р$ – время исправной работы, $t_п$ – время вынужденного простоя)

1. Критерии надежности невосстанавливаемых изделий

Рассмотрим следующую модель испытаний. Пусть на испытании находится N_0 изделий и пусть испытания считаются законченными, если все они отказали. Причем вместо отказавших образцов отремонтированные или новые не ставятся. Тогда критериями надежности данных изделий являются:

– вероятность безотказной работы $P(t)$;
– частота отказов $a(t)$;
– интенсивность отказов $\lambda(t)$;
– средняя наработка до первого отказа $T_{ср}$.

Вероятностью безотказной работы называется вероятность того, что при определенных условиях эксплуатации в заданном интервале времени или в пределах заданной наработки не произойдет ни одного отказа.

Согласно определению

$$P(t) = P(T > t), \tag{1.1}$$

где t – время, в течение которого определяется вероятность безотказной работы; T – время работы изделия от его включения до первого отказа.

Вероятность безотказной работы по статистическим данным об отказах оценивается выражением

$$\overline{P}(t) = (N_0 - n(t)) / N_0, \qquad (1.2)$$

где $P(t)$ – статистическая оценка вероятности безотказной работы; N_0 – количество изделий в начале испытания; $n(t)$ – количество отказавших изделий за время t. При большом количестве изделий N_0 статистическая оценка $P(t)$ практически совпадает с вероятностью безотказной работы $P(t)$. На практике иногда более удобной характеристикой является вероятность отказа $Q(t)$.

Вероятностью отказа называется вероятность того, что при определенных условиях эксплуатации в заданном интервале времени возникнет хотя бы один отказ. Отказ и безотказная работа являются событиями несовместными и противоположными, поэтому

$$Q(t) = P(T \le t), \overline{Q}(t) = n(t) / N_0, Q(t) = 1 - P(t). \qquad (1.3)$$

Частотой отказов называется отношение числа отказавших изделий в единицу времени к первоначальному числу испытываемых изделий при условии, что все вышедшие из строя изделия не восстанавливаются.

Согласно определению

$$\overline{a}(t) = n(\Delta t) / N_0 \Delta t, \qquad (1.4)$$

где $n(\Delta t)$ – число отказавших образцов в интервале времени от $t - \Delta t/2$ до $t+$ $+ \Delta t/2$.

Частота отказов есть плотность вероятности (или закон распределения) времени работы изделия до первого отказа.

Поэтому

$$a(t) = -P'(t) = Q'(t), \quad Q(t) = \int_0^t a(t)dt, \quad P(t) = 1 - \int_0^t a(t)dt, \qquad (1.5)$$

Интенсивностью отказов называется отношение числа отказавших изделий в единицу времени к среднему числу изделий, исправно работающих в данный отрезок времени. Согласно определению

$$\overline{\lambda}(t) = n(\Delta t) / (N_{\text{ср}} \Delta t), \qquad (1.6)$$

где $N_{ср.} = (N_i + N_{i+1}) / 2$ – среднее число исправно работающих изделий в интервале Δt; N_i – число изделий, исправно работающих в начале интервала Δt; N_{i+1} – число изделий исправно работающих в конце интервала Δt.

Выражение (1.6) есть статистическое определение интенсивности отказов. Вероятностная оценка этой характеристики находится из выражения

$$\lambda(t) = a(t) / P(t). \tag{1.7}$$

Интенсивность отказов и вероятность безотказной работы связаны между собой зависимостью

$$P(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t)\,dt}. \tag{1.8}$$

Средней наработкой до первого отказа называется математическое ожидание времени работы изделия до отказа.

Как математическое ожидание $T_{ср}$ вычисляется через частоту отказов (плотность распределения времени безотказной работы)

$$M[t] = T_{ср} = \int_{-\infty}^{+\infty} t a(t) dt. \tag{1.9}$$

Так как t положительно и $P(0) = 1$, а $P(\infty) = 0$, то

$$T_{ср} = \int_0^{\infty} P(t) dt. \tag{1.10}$$

По статистическим данным об отказах средняя наработка до первого отказа вычисляется по формуле

$$\overline{T}_{ср} = (\sum_{i=1}^{N_0} t_i) / N_0, \tag{1.11}$$

где t_i – время безотказной работы i-го образца; N_0 – количество испытуемых образцов.

Как видно из формулы (1.11), для определения средней наработки до первого отказа необходимо знать моменты выхода из строя всех испытуемых элементов. Поэтому для вычисления $T_{ср}$ пользоваться указанной формулой неудобно. Имея данные о количестве вышедших из строя элементов

n_i в каждом i-м интервале времени, среднюю наработку до первого отказа лучше определять из уравнения

$$\overline{T}_{\text{ср}} = (\sum_{i=1}^{m} n_i t_{\text{ср}i}) / N_0 . \qquad (1.12)$$

В выражении (1.12) $t_{\text{ср}}$ и m находятся по следующим формулам:

$$t_{\text{ср}i} = (t_{i-1} + t_i)/2, \quad m = t_к / \Delta t,$$

где t_{i-1} – время начала i-го интервала; t_i – время конца i-го интервала; $t_к$ – время, в течение которого вышли из строя все элементы; $\Delta t = t_{i-1} - t_i$ – интервал времени.

При изучении надежности технических устройств наиболее часто применяются следующие законы распределения времени безотказной работы: экспоненциальный, усеченный нормальный, Релея, Гамма, Вейбулла, логарифмически нормальный.

В таблице приведены выражения для оценки количественных характеристик надежности изделий при указанных законах распределения времени их безотказной работы.

Из выражений для оценки количественных характеристик надежности видно, что все характеристики, кроме средней наработки до первого отказа, считаются функциями времени. На рис. 1.2 приведены типичные зависимости количественных характеристик надежности изделий различного назначения от времени.

Рассмотренные критерии надежности позволяют достаточно полно оценить надежность невосстанавливаемых изделий. Они также позволяют оценить надежность восстанавливаемых изделий до первого отказа. Наличие нескольких критериев вовсе не означает, что всегда нужно оценивать надежность изделий по всем критериям.

Наиболее полно надежность изделий характеризуется частотой отказов $a(t)$. Это объясняется тем, что частота отказов представляет собой плотность распределения, а поэтому несет в себе всю информацию о случайном явлении – времени безотказной работы.

Средняя наработка до первого отказа – достаточно наглядная характеристика надежности. Однако применение этого критерия для оценки надежности сложной системы ограничено в тех случаях, когда:

Основные соотношения для количественных характеристик надежности при различных законах распределения времени до отказа

Наименование закона распределения	Частота отказов (плотность распределения)	Вероятность безотказной работы	Интенсивность отказов	Средняя наработка до первого отказа
Экспоненциальный	$\lambda e^{-\lambda t}$	$e^{-\lambda t}$	$\lambda = \mathrm{const}$	$1 / \lambda$
Релея	$\frac{t}{\sigma^2} e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}}$	$e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}}$	$\frac{t}{\sigma^2}$	$\sqrt{\frac{\pi}{2}}\sigma$
Гамма (при *к* целом)	$\lambda_0 \frac{(\lambda_0 t)^{\kappa-1}}{(\kappa-1)!} e^{-\lambda_0 t}$	$e^{-\lambda_0 t} \sum_{i=0}^{\kappa-1} \frac{(\lambda_0 t)^i}{i!}$	$e^{-\lambda_0 t} \sum_{i=0}^{\kappa-1} \frac{(\lambda_0 t)^i}{i!}$	$\frac{\kappa}{\lambda_0}$

Окончание таблицы

Наименование закона распределения	Частота отказов (плотность распределения)	Вероятность безотказной работы	Интенсивность отказов	Средняя наработка до первого отказа
Вейбулла	$\lambda_0 \kappa t^{\kappa-1} e^{-\lambda_0 t^{\kappa}}$	$e^{-\lambda_0 t^{\kappa}}$	$\lambda_0 \kappa t^{\kappa-1} e^{-\lambda_0 t^{\kappa}}$	$\dfrac{T(\frac{1}{\kappa}+1)}{\lambda_0^{\frac{1}{\kappa}}}$
Усеченный нормальный	$\dfrac{1}{F(\frac{T_1}{\sigma})\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-T)^2}{2\sigma^2}}$	$\dfrac{F(\frac{T_1-t}{\sigma})}{F(\frac{T_1}{\sigma})}$	$\dfrac{e^{-\frac{(t-T)^2}{2\sigma^2}}}{\sqrt{2\pi}\sigma F(\frac{T_1-t}{\sigma})}$	$T_1+\dfrac{\sigma}{\sqrt{2\pi}\sigma F(\frac{T_1}{\sigma})} e^{-\frac{T_1^2}{2\sigma^2}}$
Логарифмически нормальный	$\dfrac{1}{\sigma t\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}(\frac{\ln t-\mu}{\sigma})^2}$	$\dfrac{1}{2}+\Phi(\dfrac{\mu-\ln t}{\sigma})$	$\dfrac{1}{\sigma t\sqrt{2\pi}} \dfrac{e^{-\frac{1}{2}(\frac{\ln t-\mu}{\sigma})^2}}{0,5+\Phi(\frac{\mu-\ln t}{\sigma})}$	$\dfrac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}\int_0^{\infty} e^{-\frac{(\ln t-\mu)^2}{2\sigma^2}} dt$

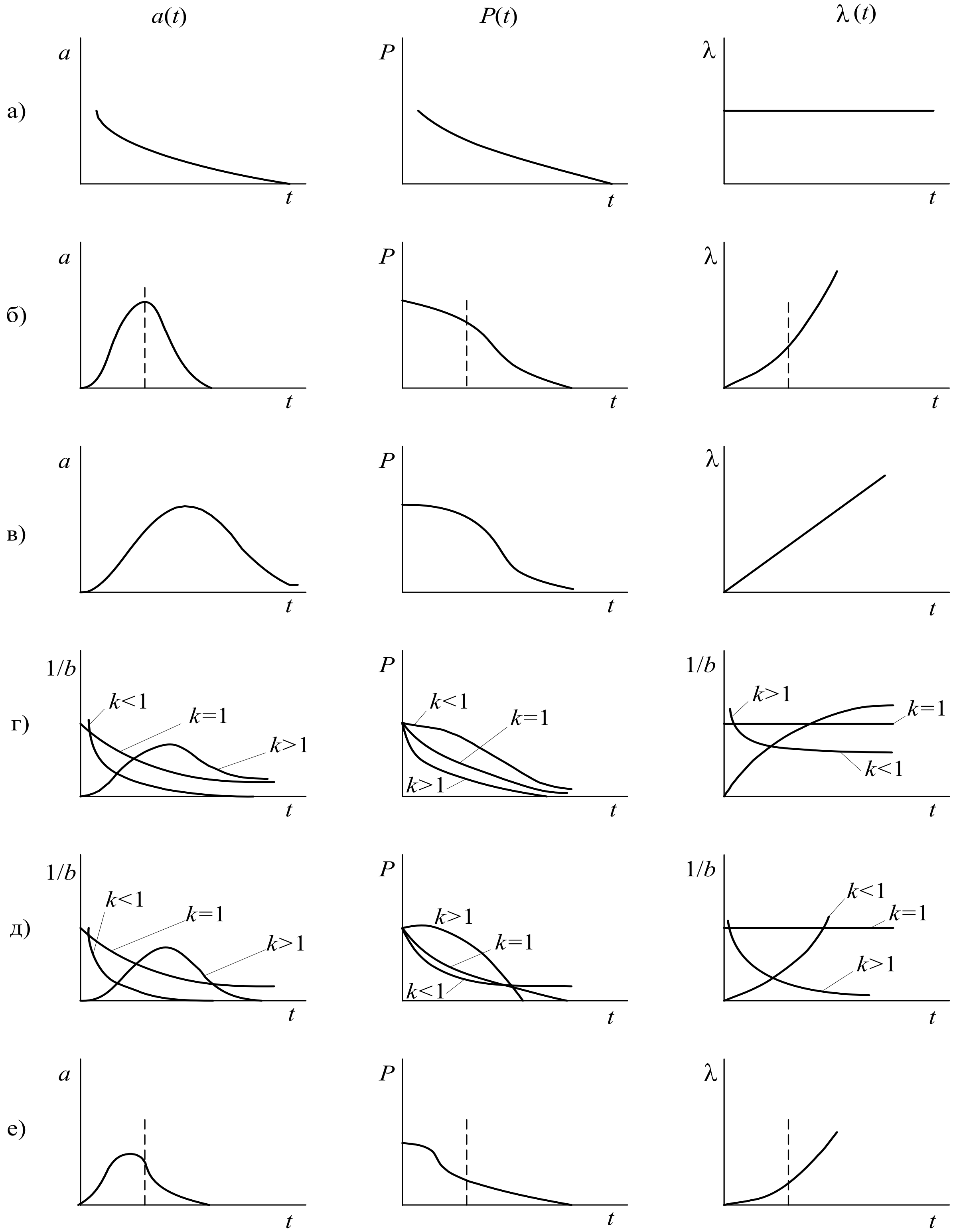


Рис. 1.2. Типичные зависимости количественных характеристик надежности от времени: а – экспоненциальный закон; б – усеченный нормальный закон; в – закон Релея; г – гамма-распределение; д – закон Вейбулла; е – логарифмически нормальный закон

– время работы системы гораздо меньше среднего времени безотказной работы;

– закон распределения времени безотказной работы не однопараметрический и для достаточно полной оценки требуются моменты высших порядков;

– система резервированная;

– интенсивность отказов непостоянная;

– время работы отдельных частей сложной системы разное.

Интенсивность отказов – наиболее удобная характеристика надежности простейших элементов, так как она позволяет более просто вычислять количественные характеристики надежности сложной системы.

Наиболее целесообразным критерием надежности сложной системы будет вероятность безотказной работы. Это объясняется следующими особенностями вероятности безотказной работы:

– она входит в качестве сомножителя в другие, более общие характеристики системы, например в эффективность и стоимость;

– характеризует изменение надежности во времени;

– может быть получена сравнительно просто расчетным путем в процессе проектирования системы и оценена в процессе ее испытания.

2. Критерии надежности восстанавливаемых изделий

Рассмотрим следующую модель испытания. Пусть на испытании находится N изделий и пусть отказавшие изделия немедленно заменяются исправными (новыми или отремонтированными). Испытания считаются законченными, если число отказов достигает величины, достаточной для оценки надежности с определенной доверительной вероятностью. Если не учитывать времени, необходимого на восстановление системы, то количественными характеристиками надежности могут быть параметр потока отказов $\omega(t)$ и наработка на отказ $t_{\text{ср.}}$

Параметром потока отказов называется отношение числа отказавших изделий в единицу времени к числу испытываемых изделий при условии, что все вышедшие из строя изделия заменяются исправными (новыми или отремонтированными).

Согласно определению

$$\overline{\omega}(t) = n(\Delta t)/(N\Delta t), \qquad (1.13)$$

где $n(t)$ – число отказавших образцов в интервале времени от $t - \Delta t/2$ до $t + \Delta t/2$; N – число испытываемых образцов; Δt – интервал времени.

Формула (1.13) выражает статистическое определение параметра потока отказов.

Параметр потока отказов и частота отказов для ординарных потоков с ограниченным последействием связаны интегральным уравнением Вольтерра второго рода

$$\omega(t) = \alpha(t) + \int_0^t \omega(\tau)\alpha(t-\tau)d\tau . \qquad (1.14)$$

По известной $\alpha(t)$ можно найти все количественные характеристики надежности невосстанавливаемых изделий. Поэтому (1.14) является основным уравнением, связывающим количественные характеристики надежности невосстанавливаемых и восстанавливаемых изделий при мгновенном восстановлении.

Уравнение (1.14) можно записать в операторной форме

$$\omega(s) = \frac{\alpha(s)}{1-\alpha(s)}, \qquad \alpha(s) = \frac{\omega(s)}{1+\omega(s)}, \qquad (1.15)$$

Соотношения (1.15) позволяют найти одну характеристику через другую, если существуют преобразования Лапласа функций $\alpha(s)$ и ω>(s) и обратные преобразования выражений (1.15).

Параметр потока отказов обладает следующими важными свойствами:

1) для любого момента времени независимо от закона распределения времени безотказной работы параметр потока отказов больше, чем частота отказов, т. е. $\omega(t) > \alpha(t)$;

2) независимо от вида функции $\alpha(t)$ параметр потока отказов $\omega(t)$ при $t \to \infty$ стремится к $1/T_{ср}$. Это важное свойство параметра потока отказов означает, что при длительной эксплуатации ремонтируемого изделия поток его отказов независимо от закона распределения времени безотказной работы становится стационарным. Однако это вовсе не означает, что интенсивность отказов есть величина постоянная;

3) если $\lambda(t)$ – возрастающая функция времени, то $\lambda(t) > \omega(t) > \alpha(t)$, если $\lambda(t)$ – убывающая функция, то $\omega(t) > \lambda(t) > \alpha(t)$;

4) при $\lambda(t) \neq \text{const}$ параметр потока отказов системы не равен сумме параметров потоков отказов элементов, т. е.

$$\omega_{\text{c}}(t) \neq \sum_{i=1}^{N} \omega_i(t). \tag{1.16}$$

Это свойство параметра потока отказов позволяет утверждать, что при вычислении количественных характеристик надежности сложной системы нельзя суммировать имеющиеся в настоящее время значения интенсивностей отказов элементов, полученные по статистическим данным об отказах изделий в условиях эксплуатации, так как указанные величины – это фактически параметры потока отказов;

5) при $\lambda(t) = \lambda = \text{const}$ параметр потока отказов равен интенсивности отказов $\omega(t) = \lambda(t) = \lambda$.

Из рассмотрения свойств интенсивности и параметра потока видно, что эти характеристики различны.

В настоящее время широко используются статистические данные об отказах, полученные в условиях эксплуатации аппаратуры. При этом они часто обрабатываются таким образом, что приводимые характеристики надежности являются не интенсивностью отказов, а параметром потока отказов $\omega(t)$. Это вносит ошибки при расчетах надежности. В ряде случаев они могут быть значительными.

Для получения интенсивности отказов элементов из статистических данных об отказах ремонтируемых систем необходимо воспользоваться формулой (1.6), для чего требуется знать предысторию каждого элемента принципиальной схемы. Это может существенно усложнить методику сбора статистических данных об отказах. Поэтому целесообразно определять $\lambda(t)$ по параметру потока отказов $\omega(t)$. Методика расчета сводится к следующим вычислительным операциям:

– по статистическим данным об отказах элементов ремонтируемых изделий и по формуле (1.13) вычисляется параметр потока отказов и строится гистограмма $\omega_i(t)$;

– гистограмма заменяется кривой, которая аппроксимируется уравнением;

– находится преобразование Лапласа $\omega_i(s)$ функции $\omega_i(t)$;

– по известной $\omega_i(s)$ на основании (1.15) записывается преобразование Лапласа $\alpha_i(s)$ частоты отказов;

– по известной $\alpha_i(s)$ находится обратное преобразование частоты отказов $\alpha_i(t)$;

– вычисляется аналитическое выражение для интенсивности отказов по формуле

$$\lambda_i(t) = \alpha_i(t) / (1 - \int_0^t \alpha_i(t) dt) ; \quad (1.17)$$

– строится график $\lambda_i(t)$.

Если имеется участок, где $\lambda_i(t) = \lambda_i = \mathrm{const}$, то постоянное значение интенсивности отказов принимается для оценки вероятности безотказной работы. При этом считается справедливым экспоненциальный закон надежности.

Приведенная методика не может быть применена, если не удается найти по $\alpha(s)$ обратное преобразование частоты отказов $\alpha(t)$. В этом случае приходится применять приближенные методы решения интегрального уравнения (1.14). Решение наиболее просто можно получить с помощью специального программного обеспечения (например *MathLab* и т. п.).

Наработкой на отказ называется среднее значение времени между соседними отказами.

Эта характеристика определяется по статистическим данным об отказах по формуле

$$\bar{t}_{\text{ср}} = (\sum_{i=1}^{n} t_i) / n, \quad (1.18)$$

где t_i – время исправной работы изделия между $(i–1)$-м и i-м отказами; n – число отказов за некоторое время t.

Из формулы (1.18) видно, что в данном случае наработка на отказ определяется по данным испытания одного образца изделия. Если на испытании находится N образцов в течение времени t, то наработка на отказ вычисляется по формуле

$$\bar{t}_{\text{ср}} = (\sum_{j=1}^{N} \sum_{i=1}^{n} t_{ij}) / \sum_{j=1}^{N} n_j, \quad (1.19)$$

где t_{ij} – время исправной работы j-го образца изделия между $(i–1)$-м и i-м отказом; n_j – число отказов за время t j-го образца.

Наработка на отказ – достаточно наглядная характеристика надежности, поэтому она получила широкое распространение на практике.

Параметр потока отказов и наработка на отказ характеризуют надежность ремонтируемого изделия и не учитывают времени на его восстановление. Поэтому они не характеризуют готовности изделия к выполнению своих функций в нужное время. Для этой цели вводятся такие критерии, как коэффициент готовности и коэффициент вынужденного простоя.

Коэффициентом готовности называется отношение времени исправной работы к сумме времен исправной работы и вынужденных простоев изделия, взятых за один и тот же календарный срок. Эта характеристика обозначается $K_г$.

Согласно данному определению

$$K_г = t_р/(t_р + t_п), \tag{1.20}$$

где $t_р$ – суммарное время исправной работы изделия; $t_п$ – суммарное время вынужденного простоя.

Времена $t_р$ и $t_п$ вычисляются по формулам

$$t_р = \sum_{i=1}^{n} t_{рi}, \qquad t_п = \sum_{i=1}^{n} t_{пi}, \tag{1.21}$$

где $t_{рi}$ – время работы изделия между $(i$–1)-м и i-м отказом; $t_{пi}$ – время вынужденного простоя после i-го отказа; n – число отказов (ремонтов) изделия.

Выражение (1.20) является статистическим определением коэффициента готовности. Для перехода к вероятностной трактовке величины $t_р$ и $t_п$ заменяются математическими ожиданиями времени между соседними отказами и времени восстановления соответственно. Тогда

$$K_г = t_{ср}/(t_{ср} + t_в), \tag{1.22}$$

где $t_{ср}$ – наработка на отказ; $t_в$ – среднее время восстановления.

Коэффициентом вынужденного простоя называется отношение времени вынужденного простоя к сумме времен исправной работы и вынужденных простоев изделия, взятых за один и тот же календарный срок.

Согласно определению

$$\overline{K}_п = t_п/(t_р + t_п) \tag{1.23}$$

или, переходя к средним величинам:

$$K_п = t_в/(t_{ср} + t_в). \tag{1.24}$$

Коэффициент готовности и коэффициент вынужденного простоя связаны между собою зависимостью

$$K_{п} = 1 - K_{г}. \tag{1.25}$$

При анализе надежности восстанавливаемых систем обычно коэффициент готовности вычисляют по формуле

$$K_{г} = T_{ср} / (T_{ср} + t_{в}). \tag{1.26}$$

Формула (1.26) верна только в том случае, если поток отказов простейший, и тогда $t_{ср} = T_{ср}$. Часто коэффициент готовности, вычисленный по формуле (1.26), отождествляют с вероятностью того, что в любой момент времени восстанавливаемая система исправна. На самом деле указанные характеристики неравноценны и могут быть отождествлены при определенных допущениях.

Действительно, вероятность возникновения отказа ремонтируемой системы в начале эксплуатации мала. С ростом времени t эта вероятность возрастает. Это означает, что вероятность застать систему в исправном состоянии в начале эксплуатации будет выше, чем по истечении некоторого времени. Между тем на основании формулы (1.26) коэффициент готовности не зависит от времени работы.

Для выяснения физического смысла коэффициента готовности $K_{г}$ запишем формулу для вероятности застать систему в исправном состоянии. При этом рассмотрим наиболее простой случай, когда интенсивность отказов и интенсивность восстановления есть величины постоянные.

Предполагая, что при $t = 0$ система находится в исправном состоянии ($P(0) = 1$), вероятность застать систему в исправном состоянии определяется из выражений

$$\begin{aligned} P_{г}(t) &= \frac{\mu}{\lambda + \mu} + \frac{\mu}{\lambda + \mu} e^{-(\lambda+\mu)t}, \\ P_{г}(t) &= K_{г} + (1 - K_{г}) e^{-t / K_{г} t_{в}}, \end{aligned} \qquad K \tag{1.27}$$

где

$$\lambda = \frac{1}{T_{ср}}; \quad \mu = \frac{1}{t_{в}}; \quad K_{г} = \frac{T_{ср}}{T_{ср} + t_{в}}.$$

Это выражение устанавливает зависимость между коэффициентом готовности системы и вероятностью застать ее в исправном состоянии в любой момент времени t.

Из (1.27) видно, что $P_г(t) \to K_г$ при $t \to \infty$, т. е. практически коэффициент готовности имеет смысл вероятности застать изделие в исправном состоянии при установившемся процессе эксплуатации.

В некоторых случаях критериями надежности восстанавливаемых систем могут быть также критерии надежности невосстанавливаемых систем, например: вероятность безотказной работы, частота отказов, средняя наработка до первого отказа, интенсивность отказов. Такая необходимость возникает всегда, когда имеет смысл оценить надежность восстанавливаемой системы до первого отказа, а также в случае, когда применяется резервирование с восстановлением отказавших резервных устройств в процессе работы системы, причем отказ всей резервированной системы не допускается.

1.2. Типовые примеры и их решение

Задачи, которые встречаются при определении количественных характеристик надежности, могут быть разбиты на следующие группы:

1) определение количественных характеристик надежности по статистическим данным об отказах изделия;

2) определение количественных характеристик надежности изделия при известном аналитическом выражении одной какой-либо характеристики.

При решении задач первой группы используются статистические определения количественных характеристик надежности, при решении задач второй группы – вероятностные определения характеристик и аналитические зависимости между ними.

В настоящем материале при определении количественных характеристик надежности технических устройств по статистическим данным об их отказах не учитывается достоверность полученных результатов. По этой причине иногда в примерах и задачах исходные данные о числе испытуемых образцов и количестве отказов приводятся без учета требований достоверности получения количественных характеристик надежности. Вопросы достоверности результатов испытаний рассматриваются во второй части.

Следует иметь в виду, что частота, интенсивность отказов и параметр потока отказов, вычисленные по формулам (1.4), (1.6) и (1.13), являются постоянными в диапазоне интервала времени Δt, а функции $\overline{\alpha}(t)$, $\overline{\lambda}(t)$, $\overline{\omega}(t)$ – ступенчатыми кривыми или гистограммами.

Для удобства изложения в дальнейшем при решении задач на определение частоты, интенсивности и параметра потока отказов по статистическим данным об отказах изделий ответы относятся к середине интервала Δt. При этом результаты вычислений графически представляются не в виде гистограмм, а в виде точек, отнесенных к середине интервалов Δt_i и соединенных плавной кривой.

Рассмотрим типовые примеры.

Пример 1.1. На испытание поставлено $N_0 = 400$ изделий. За время $t = 3000$ ч отказало $n(t) = 200$ изделий, за интервал времени $\Delta t = 100$ ч отказало $n(\Delta t) = 100$ изделий (рис. 1.3). Требуется определить $\overline{P}(3000)$, $\overline{P}(3100)$, $\overline{P}(3050)$, $\overline{\alpha}(3050)$, $\overline{\lambda}(3050)$.

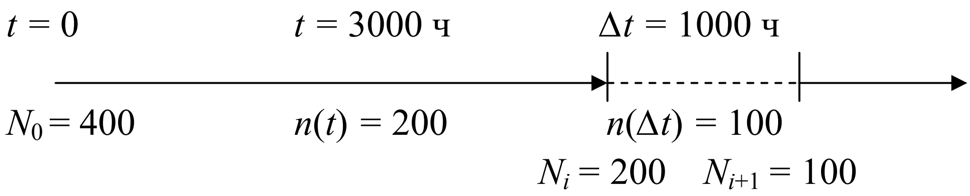


Рис. 1.3. Временной график к примеру 1.1

Решение: 1. По формуле (1.2) найдем вероятность безотказной работы:

для $t_{н} = 3000$ ч (начало интервала)

$$\overline{P}(3000) = \frac{N_0 - n(3000)}{N_0} = \frac{400 - 200}{400} = 0{,}5;$$

для $t_{к} = 3100$ ч (конец интервала)

$$\overline{P}(3100) = \frac{N_0 - n(3100)}{N_0} = \frac{400 - 300}{400} = 0{,}25.$$

Определим среднее число исправно работающих образцов в интервале Δt $N_{ср} = \dfrac{N_i + N_{i+1}}{2} = \dfrac{200 + 100}{2} = 150.$

Число отказавших изделий за время $t = 3050$ ч

$$n(3050) = N_0 - N_{ср} = 400 - 150 = 250,$$

тогда

$$\overline{P}(3050)=\frac{N_0-n(3050)}{N_0}=\frac{400-250}{400}=0{,}375.$$

2. По формуле (1.4) определяем частоту отказа.

$$\overline{\alpha}(3050)=\frac{n(\Delta t)}{\Delta t N_0}=\frac{100}{1000\cdot 400}=2{,}5\cdot 10^{-3}\,\frac{1}{\text{ч}},$$

3. По формуле (1.6) определяем частоту отказа.

$$\overline{\lambda}(3050)=\frac{n(\Delta t)}{\Delta t N_{\text{ср}}}=\frac{100}{100(200+100)/2}\approx 6{,}7\cdot 10^{-3}\,\frac{1}{\text{ч}}.$$

Интенсивность отказа можно также определить по формуле (1.7).

$$\overline{\lambda}(3050)=\frac{\overline{\alpha}(3050)}{\overline{P}(3050)}=\frac{0{,}0025}{0{,}375}\approx 6{,}7\cdot 10^{-3}\,\frac{1}{\text{ч}}.$$

Пример 1.2. Производилось наблюдение за работой трех экземпляров однотипной аппаратуры. За период наблюдения было зафиксировано по первому экземпляру аппаратуры 6 отказов, по второму и третьему – 11 и 8 отказов соответственно. Наработка первого экземпляра составила 181 ч, второго – 329 ч и третьего – 245 ч. Требуется определить наработку аппаратуры на отказ.

Решение: 1. Определяем суммарную наработку трех образцов аппаратуры:

$$t_\Sigma=\sum_{j=1}^{N}\sum_{i=1}^{nj}t_{ij}=181+329+245=755\ \text{ч.}$$

2. Определяем суммарное количество отказов.

$$n_\Sigma=\sum_{j=1}^{N}n_j=6+11+8=25\ \text{отказов.}$$

3. Находим среднюю наработку на отказ по формуле (1.19).

$$\overline{t}_{\text{ср}}=\Big(\sum_{j=1}^{N}\sum_{i=1}^{n}t_{ij}\Big)/\sum_{j=1}^{N}n_j=t_\Sigma/n_\Sigma=755/25=30{,}2\ \text{ч.}$$

Пример 1.3. Система состоит из 5 приборов, причем отказ любого одного из них ведет к отказу системы. Известно, что первый прибор отказал 34 раза в течение 952 ч работы, второй – 24 раза в течение 960 ч работы, а остальные приборы в течение 210 ч работы отказали 4, 6 и 5 раз соответственно. Требуется определить наработку на отказ системы в целом, если справедлив экспоненциальный закон надежности для каждого из пяти приборов.

Решение. Для решения данной задачи воспользуемся следующими соотношениями $\lambda_{\text{с}} = \sum_{i=1}^{N} \lambda_i$ и $t_{\text{ср}} = \frac{1}{\lambda_{\text{с}}}$.

1. Определим интенсивность отказов для каждого прибора

$$\alpha' = 1 - 0{,}897 = 0{,}10 \quad \overline{\lambda_1} = \frac{34}{952} = 0{,}357\frac{1}{\text{ч}}, \quad \overline{\lambda_{3,4,5}} = \frac{4+6+5}{210} = 0{,}0714\frac{1}{\text{ч}}.$$

2. Интенсивность отказов системы будет

$$\lambda_{\text{с}} = \sum_{i=1}^{N} \lambda_i = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_{3,4,5} = 0{,}0357 + 0{,}025 + 0{,}0714 = 0{,}1321\frac{1}{\text{ч}}.$$

3. Средняя наработка на отказ системы равна

$$t_{\text{ср}} = \frac{1}{\lambda_{\text{с}}} = \frac{1}{0{,}1321} = 7{,}57 \text{ ч}.$$

Пример 1.4. Пусть время работы элемента до отказа подчинено экспоненциальному закону распределения с параметром $\lambda = 2{,}5 \cdot 10^{-5}$ 1/ч.

Требуется вычислить количественные характеристики надежности элемента $P(t)$, $\alpha(t)$, $T_{\text{ср}}$, если t = 500, 1000, 2000 ч.

Решение. Используем формулы для $P(t)$, $\alpha(t)$ и $T_{\text{ср}}$, приведенные в таблице.

1. Вычислим вероятность безотказной работы.

$$P(t) = e^{-\lambda t} = e^{-2{,}5\cdot 10^{-5} t}$$

Используя данные табл. П 7.14 [7], получим:

$$P(500) = e^{-2{,}5\cdot 10^{-5}\cdot 500} = e^{-0{,}0125} = 0{,}9875 ,$$

$$P(1000) = e^{-2{,}5\cdot 10^{-5}\cdot 1000} = e^{-0{,}025} = 0{,}9753 ,$$

$$P(2000) = e^{-2{,}5\cdot 10^{-5}\cdot 2000} = e^{-0{,}05} = 0{,}9512 .$$

2. Вычислим частоту отказа

$$\alpha(t) = \lambda(t) P(t) = 2{,}5 \cdot 10^{-5} \cdot e^{-2{,}5\cdot 10^{-5} t} ,$$

$$\alpha(500) = 2{,}5 \cdot 10^{-5} \cdot e^{-2{,}5 \cdot 10^{-5} \cdot 500} = 2{,}5 \cdot 10^{-5} \cdot 0{,}9875 = 2{,}469 \cdot 10^{-5}\ \frac{1}{ч},$$

$$\alpha(1000) = 2{,}5 \cdot 10^{-5} \cdot e^{-2{,}5 \cdot 10^{-5} \cdot 1000} = 2{,}5 \cdot 10^{-5} \cdot 0{,}9753 = 2{,}439 \cdot 10^{-5}\ \frac{1}{ч},$$

$$\alpha(2000) = 2{,}5 \cdot 10^{-5} \cdot e^{-2{,}5 \cdot 10^{-5} \cdot 2000} = 2{,}5 \cdot 10^{-5} \cdot 0{,}9512 = 2{,}378 \cdot 10^{-5}\ \frac{1}{ч}.$$

3. Вычислим среднюю наработку до первого отказа

$$T\text{ср} = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{2{,}5 \cdot 10^{-5}} = 40000\ \text{ч}.$$

1.3. Задачи

1.1. Допустим, что на испытание поставлено 1000 однотипных изделий. За первые 3000 ч отказало 80 изделий. За интервал времени 3000 – 4000 ч отказало еще 50. Требуется определить частоту и интенсивность отказов изделий в промежутке времени 3000 – 4000 ч.

1.2. В течение 1000 ч из 10 гироскопов отказало 2. За интервал времени 1000 – 1100 ч отказал еще один гироскоп. Требуется найти частоту и интенсивность отказов гироскопов в промежутке времени 1000 – 1100 ч.

1.3. На испытание поставлено 400 резисторов. За время наработки 10000 ч отказало 4 резистора. За последующие 1000 ч отказал еще 1 резистор. Определить частоту и интенсивность отказов резисторов в промежутке времени 10000 – 11000 ч.

1.4. На испытание поставлено $N_0 = 1000$ изделий. За время $t = 0$ ч вышло из строя $n(t) = 0$ штук изделий. За последующий интервал времени $\Delta t = 1000$ ч вышло из строя $n(\Delta t) = 20$ изделий. Необходимо вычислить вероятность безотказной работы за время t и $t + \Delta t$, частоту отказов и интенсивность отказов на интервале t.

1.5. Интенсивность отказов изделия $\lambda = 0{,}82 \cdot 10^{-3}$ 1/ч = const. Необходимо найти вероятность безотказной работы системы в течение 6 ч $P(6)$, частоту отказов $\alpha(100)$ при $t = 100$ ч и среднюю наработку до первого отказа $T_{\text{ср}}$.

1.6. Средняя наработка до первого отказа автоматической системы управления равна 640 ч. Предполагается, что справедлив экспоненциальный закон надежности. Необходимо определить вероятность безотказной работы в течение 120 ч, частоту отказов для момента времени 120 ч и интенсивность отказов.

1.7. Средняя наработка изделия до первого отказа равна 1260 ч. Время исправной работы подчинено закону Релея. Необходимо найти его количественные характеристики надежности для t =1000 ч.

1.8. Вероятность безотказной работы гироскопа в течение t =150 ч равна 0,9. Время исправной работы подчинено закону Вейбулла с параметром $k = 2{,}6$. Необходимо определить опасность отказов гироскопов для t = 150 ч и среднюю наработку до первого отказа.

1.9. Частота отказов изделия $\alpha(t) = k^2te^{-kt}$. Требуется определить параметр потока отказов $\omega(t)$.

1.10. При проведении форсированных испытаний изделия получена зависимость $\lambda(t)$, приведенная на рис. 1.4. Необходимо найти вероятность безотказной работы в течение t =1000 ч, частоту отказов для t =1000 ч и среднюю наработку до первого отказа изделий.

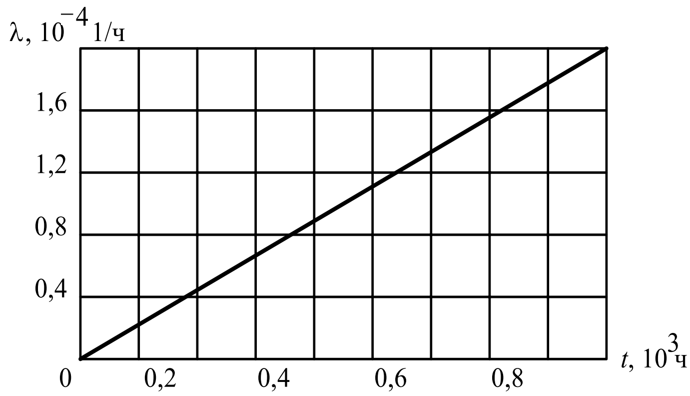


Рис. 1.4. Зависимость λ от t (к задаче 1.10)

1.11. Интенсивность отказов $\lambda_с$ сложной восстанавливаемой системы есть величина постоянная и равная 0,015 1/ч. Среднее время восстановления $t_в$=100 ч. Необходимо вычислить вероятность застать систему в исправном состоянии в момент времени t =10 ч.

1.12. Коэффициент готовности сложного восстанавливаемого изделий $K_г$ = 0,9. Среднее время его восстановления $t_в$ = 100 ч. Требуется найти вероятность застать изделие в исправном состоянии в момент времени t =12 ч.

1.13. Время работы изделия подчинено усеченному нормальному закону с параметрами T_1=8000 ч, δ_1=1000 ч. Требуется найти вероятность безотказной работы изделия в течение 8000 ч.

2. РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК НАДЕЖНОСТИ НЕВОССТАНАВЛИВАЕМЫХ ИЗДЕЛИЙ ПРИ ОСНОВНОМ СОЕДИНЕНИИ ЭЛЕМЕНТОВ

2.1. Методы расчета

Если отказ технического устройства наступает при отказе одного из его элементов, то говорят, что такое устройство имеет основное соединение элементов. При расчете надежности таких устройств предполагают, что отказ элемента является событием случайным и независимым.

Тогда вероятность безотказной работы изделия в течение времени равна произведению вероятностей безотказной работы ее элементов в течение того же времени. Так как вероятность безотказной работы элементов в течение времени t можно выразить через интенсивность отказов в виде (1.8), то расчетные формулы для вероятности безотказной работы технического устройства при основном соединении элементов можно записать следующим образом:

$$P_{\text{c}}(t) = p_1(t)p_2(t)...p_N(t) = \prod_{i=1}^{N} p_i(t),$$

$$P_{\text{c}}(t) = \exp(-\int_0^t \lambda 1_1(t)dt)\exp(-\int_0^t \lambda_2(t)dt), \tag{2.1}$$

$$\exp(-\int_0^t \lambda_N(t)dt) = \exp(-\sum_{i=1}^{N} \int_0^t \lambda_i(t)dt).$$

Выражения (2.1) наиболее общие. Они позволяют определить вероятность безотказной работы изделий до первого отказа при любом законе изменения интенсивности отказов во времени.

На практике наиболее часто интенсивность отказов изделий − величина постоянная.

При этом время возникновения отказов обычно подчинено экспоненциальному закону распределения, т. е. для нормального периода работы аппаратуры справедливо условие λ=const.

В этом случае выражения для количественных характеристик примут вид

$$P_{\text{c}}(t) = e^{-\lambda_c t} = e^{-t/T\text{cp}}, \lambda_{\text{c}} = \sum_{t=1}^{N} \lambda_i,$$

$$a_{\text{c}}(t) = \lambda_{\text{c}} e^{-\lambda_{\text{c}} t}, T_{\text{cp}} = 1/\lambda_{\text{c}}. \tag{2.2}$$

Если все элементы данного типа равнонадежны, интенсивность отказов системы будет

$$\lambda_{с} = \sum_{i=1}^{r} N_i \lambda_i . \tag{2.3}$$

На практике очень часто приходится вычислять вероятность безотказной работы высоконадежных систем. При этом произведение $\lambda_{с} t$ значительно меньше единицы, а вероятность безотказной работы *P(t)* близка к единице. В этом случае, разложив $e^{-\lambda_{с} t}$ в ряд и ограничившись первыми двумя его членами, с высокой степенью точности можно вычислить *P(t).*

Тогда основные количественные характеристики надежности можно с достаточной для практики точностью вычислить по следующим приближенным формулам:

$$\begin{gathered} P_{с}(t) \approx 1 - t\sum_{i=1}^{r} N_i \lambda_i = 1 - \lambda_{с} t, \quad \lambda_{с} = \sum_{i=1}^{r} N_i \lambda_i , \\ T_{с} = 1 / \sum_{i=1}^{r} N_i \lambda_{\mathrm{i}} = 1/\lambda_{с}, \quad a(t) \approx \lambda_{с}(1 - \lambda_{с} t). \end{gathered} \tag{2.4}$$

Вычисление количественных характеристик надежности по приближенным формулам не дает больших ошибок для систем, вероятность безотказной работы которых превышает 0,9, т. е. для $\lambda_{с} t \le 0{,}1$.

При расчете надежности систем часто приходится перемножать вероятности безотказной работы отдельных элементов расчета, возводить их в степень и извлекать корни.

При значениях *P*(*t*), близких к единице, эти вычисления можно с достаточной для практики точностью выполнять по следующим приближенным формулам:

$$\begin{gathered} P_1(t) P_2(t) ... (P_N(t) \approx 1 - \sum_{i=1}^{N} q_i(t), \\ p_i^{\,N}(t) = 1 - q_i(t) / N. \end{gathered} \tag{2.5}$$

В зависимости от полноты учета факторов, влияющих на работу изделия, различают прикидочный, ориентировочный и окончательный расчет надежности.

1. Прикидочный расчет надежности

Прикидочный расчет основывается на следующих допущениях:

– все элементы изделия равнонадежны;

– опасности отказов всех элементов изделия не зависят от времени;

– отказ любого элемента приводит к отказу всего изделия.

Прикидочный расчет надежности применяется в следующих случаях:

1) при проверке требований по надежности, выдвинутых заказчиком в техническом задании (ТЗ) на проектирование изделия;

2) при расчете нормативных данных по надежности отдельных блоков, устройств и приборов системы (расчет норм надежности отдельных частей системы);

3) для определения минимально допустимого уровня надежности элементов проектируемого изделия;

4) при сравнительной оценке надежности отдельных вариантов изделия на этапах предэскизного и эскизного проектирования.

Прикидочный расчет надежности позволяет судить о принципиальной возможности обеспечения требуемой надежности изделия. Характеристики надежности рассчитываются по формулам (2.2) или (2.4).

2. Ориентировочный расчет надежности

Ориентировочный расчет надежности учитывает влияние на надежность только количества и типов примененных элементов и основывается на следующих допущениях:

– все элементы данного типа равнонадежны, т. е. величины интенсивности отказов (λ_i) для этих элементов одинаковы;

– все элементы работают в номинальном (нормальном) режиме, предусмотренном техническими условиями;

– интенсивности отказов всех элементов не зависят от времени, т. е. в течение срока службы у элементов, входящих в изделие, отсутствует старение и износ, следовательно $\lambda_i(t) = \text{const}$.

– отказы элементов изделия события случайные и независимые;

– все элементы изделия работают одновременно.

Для определения надежности изделия необходимо знать:

1) вид соединения;

2) типы элементов каждого типа;

3) величины интенсивности отказов элементов, входящих в изделие. Каждый тип элементов выбирается по соответствующим таблицам.

Таким образом, при ориентировочном расчете надежности достаточно знать структуру системы, номенклатуру примененных элементов и их количество.

Ориентировочный метод расчета надежности используется на этапе эскизного проектирования после разработки принципиальных электрических схем изделий. Этот расчет позволяет определить рациональный состав элементов изделий и наметить пути повышения надежности изделия на стадии эскизного проектирования и проводится по формулам (2.2) – (2.4).

3. Расчет надежности с учетом режимов работы элементов (окончательный расчет)

Окончательный расчет надежности изделия выполняется тогда, когда известны реальные режимы работы элементов после испытания в лабораторных условиях макетов и основных узлов изделия или после тщательного расчета схемы.

Элементы изделия находятся обычно в различных режимах работы, сильно отличающихся от номинальной величины. Это влияет на надежность как изделия в целом, так и отдельных его составляющих частей. Выполнение окончательного расчета надежности возможно только при наличии данных о коэффициентах нагрузки отдельных элементов и при наличии графиков зависимости интенсивности отказов элементов от их электрической нагрузки, температуры окружающей среды и других факторов, т. е. для окончательного расчета необходимо знать зависимости

$$\lambda_{\text{с}} = f(K_{\text{н}}, T^0, ...).$$

Эти зависимости приводятся в виде графиков либо их можно рассчитать с помощью так называемых поправочных коэффициентов интенсивности отказов $\Delta\lambda_{k_h}$, $\Delta\lambda_{\text{т}}$, позволяющих учесть влияние различных факторов на надежность изделия.

Для определения надежности изделия необходимо знать:

1) число элементов с разбивкой их по типам и режимам работы;

2) зависимости интенсивности отказов элементов от электрического режима работы и заданных внешних условий;

3) структуру системы.

В общем случае λ_i зависит от следующих воздействующих факторов: электрического режима работы данного элемента; окружающей температуры; вибрационных воздействий; механических ударов; линейных ускорений; влажности; воздействия морской воды; воздействия биологических факторов (грибок, плесень, насекомые); давления; реактивного облучения и ряда других возможных факторов.

Знание зависимости интенсивности отказов λ_i от воздействующих факторов представляется необходимым для правильного использования элементов с целью получения заданной вероятности исправной работы за время.

Наиболее существенными воздействующими факторами можно назвать окружающую температуру и скорость ее изменения; электрическую нагрузку; механические перегрузки, вызванные вибрациями, ударами и линейными ускорениями.

При разработке и изготовлении элементов обычно предусматриваются определенные, так называемые «нормальные» условия работы: температура +25 ± 10 °С, номинальный электрический режим, относительная влажность 60 ± 20 %, отсутствие механических перегрузок и т. д. Интенсивность отказов элементов в номинальном режиме эксплуатации называется номинальной интенсивностью отказов λ_i.

Интенсивность отказов λ_i элементов при эксплуатации в реальных условиях λ_i равна номинальной интенсивности отказов λ_{0i}, умноженной на поправочные коэффициенты a_i и k_i. Поправочный коэффициент интенсивности отказов $a_i = f(t^\circ, K_\text{н})$ учитывает влияние окружающей температуры и электрической нагрузки, поправочный коэффициент интенсивности отказов $k_i = f(i, \varphi)$ – тип воздействия, главным образом механические перегрузки, и относительную влажность окружающего воздуха.

Графики $a_i = f(t^\circ, K_\text{н})$ приведены в прил. 4 [9]. Значения поправочных коэффициентов k приведены в табл. 2.1 – 2.3.

Окончательный расчет надежности применяется на этапе технического проектирования изделия. Он обычно возможен тогда, когда на изделие заполнена так называемая ведомость (карта) режимов работы элементов. Этот расчет ведется по известным характеристикам надежности деталей, узлов, блоков, механизмов, приборов и т. п., входящих в изделие.

Таблица 2.1

Поправочные коэффициенты k в зависимости от воздействия механических факторов на неамортизированную аппаратуру

Условия эксплуатации аппаратуры	Вибрация k_1	Ударные нагрузки k_2	Суммарное воздействие k_1k_2
Лабораторные	1,0	1,0	1,0
Стационарные (полевые)	1,04	1,03	1,07
Корабельные	1,3	1,05	1,37
Автофургонные	1,35	1,08	1,46
Железнодорожные	1,4	1,1	1,54
Самолетные	1,46	1,13	1,65

Таблица 2.2

Поправочные коэффициенты k_3

Влажность, %	Температура, ^{0}C	Поправочный коэффициент k_3
60 – 70	20 – 40	1,0
90 – 98	20 – 25	2,0
90 – 98	30 – 40	2,5

Таблица 2.3

Поправочные коэффициенты k_4

Высота, км	Поправочный коэффициент k_4	Высота, км	Поправочный коэффициент k_4
0 – 1	1,0	8 – 10	1,25
1 – 2	1,05	10 – 15	1,3
2 – 3	1,1	15 – 20	1,35
3 – 5	1,14	20 – 25	1,38
5 – 6	1,16	25 – 30	1,4
6 – 8	1,2	30 – 40	1,45

Как правило, при расчете изделие расчленяется на отдельные конструктивно самостоятельные части путем деления системы на приборы, приборов на крупные узлы и блоки, блоков и крупных узлов на более мелкие узлы и т. д. При этом расчет проводится последовательно от простого к сложному.

Например, при расчете надежности системы следует определить вначале количественные характеристики отдельных приборов по известным количественным характеристикам их узлов и деталей, затем вычислить количественные характеристики системы по рассчитанным количественным характеристикам отдельных приборов. Будем называть каждое устройство, имеющее количественную характеристику надежности, элементом расчета надежности. Тогда элементами расчета надежности могут быть детали (резистор, конденсатор, микросхема и так далее), узлы (электронный усилитель, триггерная ячейка), блоки (приемник, передатчик), приборы (вычислительный, счетно-решающий) и даже системы, если вычисляется надежность комплекса систем.

При расчетах полезно применять интервальную оценку характеристик надежности. При этом интенсивности отказов элементов рассматриваются как случайные величины, взятые из нормальной генеральной совокупности. Тогда при доверительной вероятности верхний $P_{в}(t)$ и нижний $P_{н}(t)$ доверительные пределы $P(t)$ находятся из равенств

$$\begin{aligned} P_{в}(t) &= P_0(t) + z_{(1+\gamma)/2\sigma}\, p(t), \\ P_{н}(t) &= z_{(1-\gamma)/2\sigma}\, p(t), \end{aligned} \tag{2.6}$$

где $P_0(t)$ – средняя вероятность безотказной работы, определяемая по средним значениям интенсивности отказов элементов; $\sigma_{p(t)}$ – среднее квадратическое отклонение; z_{β} – квантиль уровня $\beta_{в}$ нормального распределения.

Для верхнего доверительного предела $\beta_{в} = (1+\gamma)/2$, для нижнего $\beta_{н} = (1-\gamma)/2$. При $\gamma = 0{,}9$ имеем

$$z_{(1+\gamma)/2} = -z_{(1-\gamma)/2} \approx 1{,}65, \tag{2.7}$$

$$\sigma_{p(t)} = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \frac{dp(t)}{d\lambda_i} \sigma^2{}_{\lambda i}\cdot}\ . \tag{2.8}$$

Аналогично находятся доверительные пределы и для других характеристик надежности. Таблицы величин интенсивностей отказов и поправочные коэффициенты для некоторых элементов приведены в прил. 3 [7].

Методика расчета надежности, как правило, включает в себя следующие моменты:

– определение типа элемента и его характеристики;

– выбор метода расчета с последующим подбором определенных номограмм, таблиц, графиков или поправочных коэффициентов;

– определение электрических нагрузок и влияния внешней среды на каждый элемент;

– определение по соответствующей таблице или графику интенсивности отказа каждого элемента;

– суммирование всех интенсивностей отказов для определения интенсивности отказов всего изделия.

При практическом определении интенсивности отказов изделия данные об интенсивностях отказов отдельных элементов рекомендуется заносить в определенном порядке в так называемые рабочие таблицы, формы которых приведены в прил. 5 [7].

Расчет надежности изделия целесообразно проводить в следующем порядке.

1. Формулируется понятие отказа.

От понятия отказа изделия зависит выбор числа элементов, которые должны учитываться при расчете надежности. Часто в сложных системах имеются элементы, выход из строя которых приводит лишь к ухудшению некоторых характеристик системы (точности, качества переходного процесса и т. д.). Выход из строя других элементов приводит к нарушению работоспособности системы, т. е. в смысле надежности эти элементы системы неравнозначны. Поэтому необходимо учитывать только те элементы, выход из строя которых приводит к отказу. Таким образом, прежде чем приступить к расчету надежности, необходимо четко сформулировать, что следует понимать под отказом изделия, а затем уже выбирать число элементов, которое должно быть учтено при расчете вероятности исправной работы или при расчете других количественных характеристик надежности.

2. Составляется схема расчета надежности.

Схему расчета надежности удобно составить таким образом, чтобы элементами расчета были конструктивно оформленные блоки. Может оказаться, что в расчетных блоках имеются элементы, работающие не все время в течение работы блока, а только некоторую часть времени. В этом случае целесообразно такие элементы распределить по времени их работы на группы и образовать из этих групп самостоятельные элементы расчета. На схеме расчета надежности целесообразно указывать время работы каждого элемента расчета.

3. Выбирается метод расчета надежности.

В соответствии с видом расчета выбираются расчетные формулы и для определения интенсивности отказов изделия по соответствующим таблицам определяются величины интенсивности отказов элементов.

При наличии ведомостей (карт) режимов работы элементов определяются коэффициенты нагрузки и по графикам или по поправочным формулам вычисляются λ_i для всех элементов.

Если в течение времени работы аппаратуры элемент имеет непостоянную интенсивность отказов, но существуют четко выраженные временные интервалы, в течение которых интенсивность отказов элемента в основном постоянна, то для расчета надежности используется так называемая эквивалентная интенсивность отказов элемента.

Допустим, что интенсивность отказов элемента за период времени t_1 равна λ_1 , за период t_2 равна λ_2 и т. д. Тогда интенсивность отказов такого элемента за период времени $t = t_1 + t_2 + \ldots$будет

$$\lambda_{\text{экв}} = (\lambda_1 t_1 + \lambda_2 t_2 + \ldots) / t \qquad (2.9)$$

4. Составляется таблица расчета интенсивности отказов изделия.

Для расчета интенсивности отказов изделия обычно используются формы таблиц, приведенных в прил. 5 [7], например: для ориентировочного расчета надежности применяется табл. П 5.1; для окончательного расчета надежности в случае использования графиков – табл. П 5.2; для окончательного расчета надежности при использовании поправочных коэффициентов – табл. П 5.3 [7].

Интенсивность отказов данного типа элемента в реальных условиях работы вычисляется по формуле

$$\lambda_i = \lambda_{io}\alpha_1\alpha_2\ldots\alpha_n = \lambda_{io}\prod_{i=1}^{n}\alpha_i , \qquad (2.10)$$

где λ_{io} – интенсивность отказов элемента, работающего в нормальных условиях при номинальной электрической нагрузке; $\alpha_1, \alpha_2, \ldots, \alpha_n$ – поправочные коэффициенты, зависящие от различных воздействующих факторов.

5. Рассчитываются количественные характеристики надежности.

Данные расчета заносятся в итоговые таблицы или приводятся в виде графиков. Расчеты оформляются в виде технического отчета.

Отчет должен содержать:

а) структурную схему надежности системы с кратким объяснительным текстом;

б) формулировку понятия отказа системы;

в) расчетные формулы для количественных характеристик надежности;

г) расчет количественных характеристик надежности, итоговые таблицы и графики;

д) оценку точности расчета;

е) выводы и рекомендации.

2.2. Типовые примеры и их решение

Пример 2.1. Система состоит из 12600 элементов, средняя интенсивность отказов которых $\lambda_{ср} = 0{,}32 \cdot 10^{-8}$ 1/ч. Необходимо определить вероятность безотказной работы в течение $t = 50$ ч.

Решение. Интенсивность отказов системы по формуле (2.3) будет $\lambda_с = \lambda_{ср} N = 0{,}32 \cdot 10^{-6} \cdot 12600 = 4{,}032 \cdot 10^{-3}$ 1/ч. Тогда на основании (2.2) $P(50) = e^{-\lambda t} \approx 0{,}82$.

Пример 2.2. Система состоит из трех блоков, средняя наработка до первого отказа которых равна $T_1 = 160$ ч, $T_2 = 320$ ч, $T_3 = 600$ ч. Для блоков справедлив экспоненциальный закон надежности. Требуется определить среднюю наработку до первого отказа системы.

Решение. Воспользуемся формулой (2.2) для средней наработки до первого отказа системы. В нашем случае

$$\lambda_с = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 = 1/160 + 1/320 + 1/600 \approx 0{,}011 \text{ 1/ч}.$$

Тогда

$$T_{ср.с} = 1/\lambda_с = 1/0{,}011 \approx 91 \text{ ч}.$$

Пример 2.3. Система состоит из двух устройств. Вероятности безотказной работы каждого из них в течение времени $t = 100$ ч равны: $p_1(100) = 0{,}95$; $p_2(100) = 0{,}97$. Справедлив экспоненциальный закон надежности. Необходимо найти среднюю наработку до первого отказа системы.

Решение. Найдем вероятность безотказной работы изделия: $P_с(100) = p_1(100) \cdot p_2(100) = 0{,}95 \cdot 0{,}97 = 0{,}92$.

Найдем интенсивность отказов изделия, воспользовавшись формулой $P_{\text{с}}(100) = e^{-\lambda_{\text{с}}100}$.

По табл. П 7.14 [9] имеем $\lambda_{\text{с}} = 0{,}83 \cdot 10^{-3}$ 1/ч.

Тогда $T_{\text{ср.с}} = 1200$ ч.

Пример 2.4. В системах могут быть использованы только элементы, интенсивность отказов которых равна $\lambda_i = 10^{-5}$ 1/ч. Системы имеют число элементов $N_1 = 500$ и $N_2 = 2500$. Требуется определить среднюю наработку до первого отказа и вероятность безотказной работы в конце первого часа $P_{\text{с}}(1)$.

Решение. Интенсивность отказов систем соответственно будет

$$\lambda_{\text{с}1} = N_1\lambda_i = 500 \cdot 10^{-5} = 0{,}5 \cdot 10^{-2} \text{ 1/ ч},$$

$$\lambda_{\text{с}2} = N_2\lambda_i = 2500 \cdot 10^{-5} = 0{,}025 \text{ 1/ ч}.$$

Тогда

$$P_{\text{с}1} = e^{-\lambda_{\text{с}}1t} = 0{,}995;$$

$$P_{\text{с}2} = e^{-0{,}025} = 0{,}975;$$

$$T_{\text{ср.с}1} = 1/0{,}5 \cdot 10^{-2} = 200 \text{ ч};$$

$$T_{\text{ср.с}\,2} = 1/0{,}025 = 40 \text{ ч}.$$

Тогда задачу можно легко решить, используя номограмму прил. П 1.1 [7].

Пример 2.5. Система состоит из пяти приборов, вероятности исправной работы которых в течение времени $t = 100$ ч равны: $p_1(100) = 0{,}9996$; $p_2(100) = 0{,}9998$; $p_3(100) = 0{,}9996$; $p_4(100) = 0{,}999$; $p_5(100) = 0{,}9998$. Требуется определить частоту отказов системы в момент времени $t = 100$ ч.

Предполагается, что отказы приборов независимы и для них справедлив экспоненциальный закон надежности.

Решение. По условию задачи отказы приборов независимы, поэтому вероятность безотказной работы системы равна произведению вероятностей безотказной работы приборов. Тогда по формуле (2.5) для случая высоконадежных систем имеем: $P(100) = 0{,}9978$, $\lambda_{\text{с}} = 2{,}2 \cdot 10^{-5}$ 1/ ч.

Тогда частота отказов в соответствии с формулой (2.4) будет

$$a_{\text{с}}(t) = \lambda_{\text{с}}(1 - \lambda_{\text{с}}t) = 2{,}2 \cdot 10^{-5}(1 - 2{,}2 \cdot 10^{-5} \cdot 100) = 2{,}195 \cdot 10^{-5} \text{ 1/ч}.$$

2.3. Задачи

2.1. Аппаратура связи состоит из 2000 элементов, средняя интенсивность отказов которых $\lambda_{ср} = 0{,}33 \cdot 10^{-5}$ 1/ч. Необходимо определить вероятность безотказной работы аппаратуры в течение $t = 200$ ч и среднюю наработку до первого отказа.

2.2. Невосстанавливаемая в процессе радиоаппаратура сантиметрового диапазона состоит из 1000 элементов.

Требующееся время непрерывной работы $t = 200$ ч. Определить вероятность безотказной работы и среднюю наработку до первого отказа, если $\lambda = 0{,}1 \cdot 10^{-5}$ 1/ч.

2.3. Система состоит из $N = 20$ приборов. Надежность приборов характеризуется вероятностью безотказной работы в течение времени t, которая равна: $p_1(t) = 0{,}98$; $p_2(t) = 0{,}94$; $p_3(t) = 0{,}99$; $p_{4,\,5,\,6}(t) = 0{,}997$; $p_{7,\,8\,9}(t) = 0{,}965$; $p_{10}(t) = 0{,}95$; $p_{11}(t) = 0{,}997$; $p_{12}(t) = 0{,}975$; $p_{13}(t) = 0{,}985$; $p_{14}(t) = 0{,}97$; $p_{15,\,16,\,17}(t) = 0{,}96$; $p_{18,\,19}(t) = 0{,}995$; $p_{20}(t) = 0{,}945$. Необходимо определить вероятность безотказной работы системы.

2.4. Система состоит из пяти приборов, средняя наработка до первого отказа которых равна: $T_1 = 83$ ч; $T_2 = 220$ ч; $T_3 = 280$ ч; $T_4 = 400$ ч; $T_5 = 700$ ч. Для приборов справедлив экспоненциальный закон надежности. Требуется найти среднюю наработку до первого отказа системы.

2.5. Прибор состоит из пяти блоков. Вероятность безотказной работы каждого блока в течение времени $p_1(50) = 0{,}98$; $p_2(50) = 0{,}99$; $p_3(50) = 0{,}998$; $p_4(50) = 0{,}975$; $p_5(50) = 0{,}985$. Справедлив экспоненциальный закон надежности. Требуется найти среднюю наработку до первого отказа прибора.

2.6. Комплекс состоит из $N = 3$ систем. Надежность отдельных систем характеризуется вероятностью безотказной работы в течение времени t, которая равна $p_1(t) = 0{,}78$, $p_2(t) = 0{,}93$, $p_3(t) = 0{,}82$. Определить вероятность безотказной работы комплекса.

2.7. Система состоит из двух блоков, средняя наработка до первого отказа которых равна $T_1 = 200$ ч; $T_2 = 40$ ч. Для блоков справедлив экспоненциальный закон надежности. Необходимо определить среднюю наработку системы до первого отказа.

2.8. Система состоит из трех устройств. Вероятность безотказной работы каждого из них в течение времени $t = 100$ ч равна: $p_1(100) = 0{,}95$; $p_2(100) = 0{,}96$; $p_3(100) = 0{,}97$. Справедлив экспоненциальный закон надежности. Необходимо вычислить среднюю наработку до первого отказа системы.

3. РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК НАДЕЖНОСТИ НЕВОССТАНАВЛИВАЕМЫХ РЕЗЕРВИРОВАННЫХ ИЗДЕЛИЙ

3.1. Методы расчета

Резервированным соединением изделий называется такое соединение, при котором отказ наступает только после отказа основного изделия и всех резервных изделий.

На практике применяются способы резервирования, приведенные на рис. 3.1. Схемные обозначения различных способов резервирования приведены на рис. 3.2. Общим резервированием называется метод повышения надежности, при котором резервируется изделие в целом (рис. 3.2, *а*). Раздельным резервированием называется метод повышения надежности, при котором резервируются отдельные части изделия (рис. 3.2, *б*).

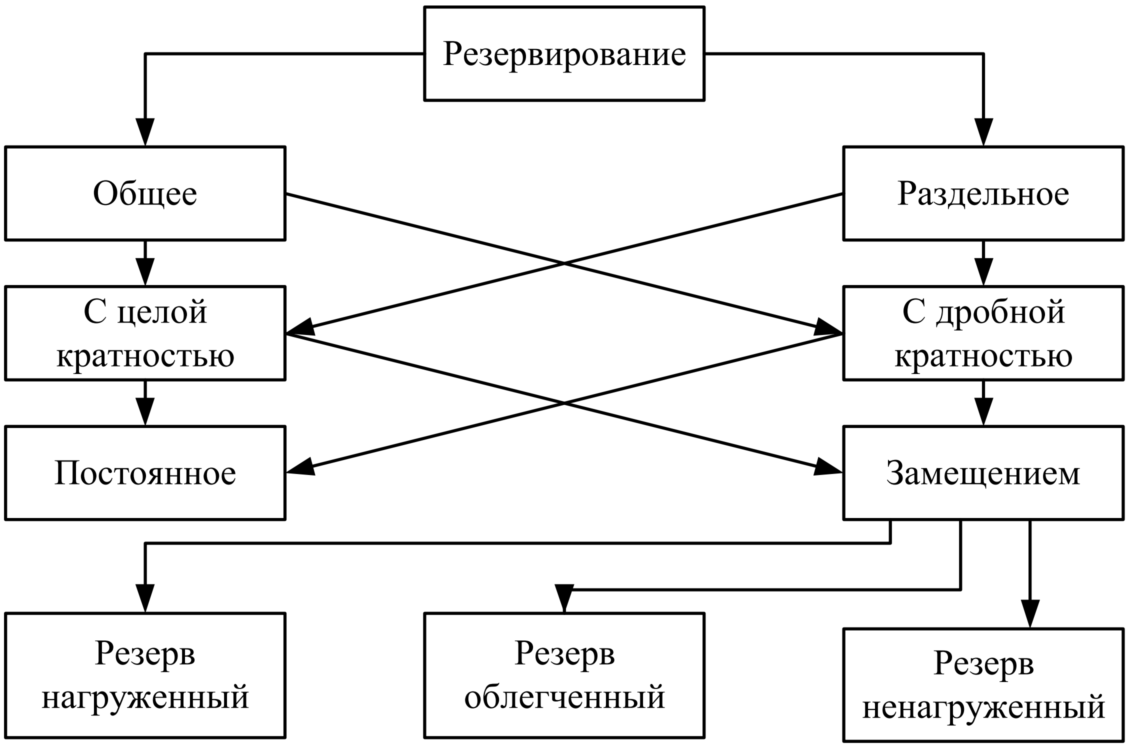


Рис. 3.1. Способы резервирования

Основной параметр резервирования – его кратность. Под кратностью резервирования m понимается отношение числа резервных изделий к числу резервируемых (основных).

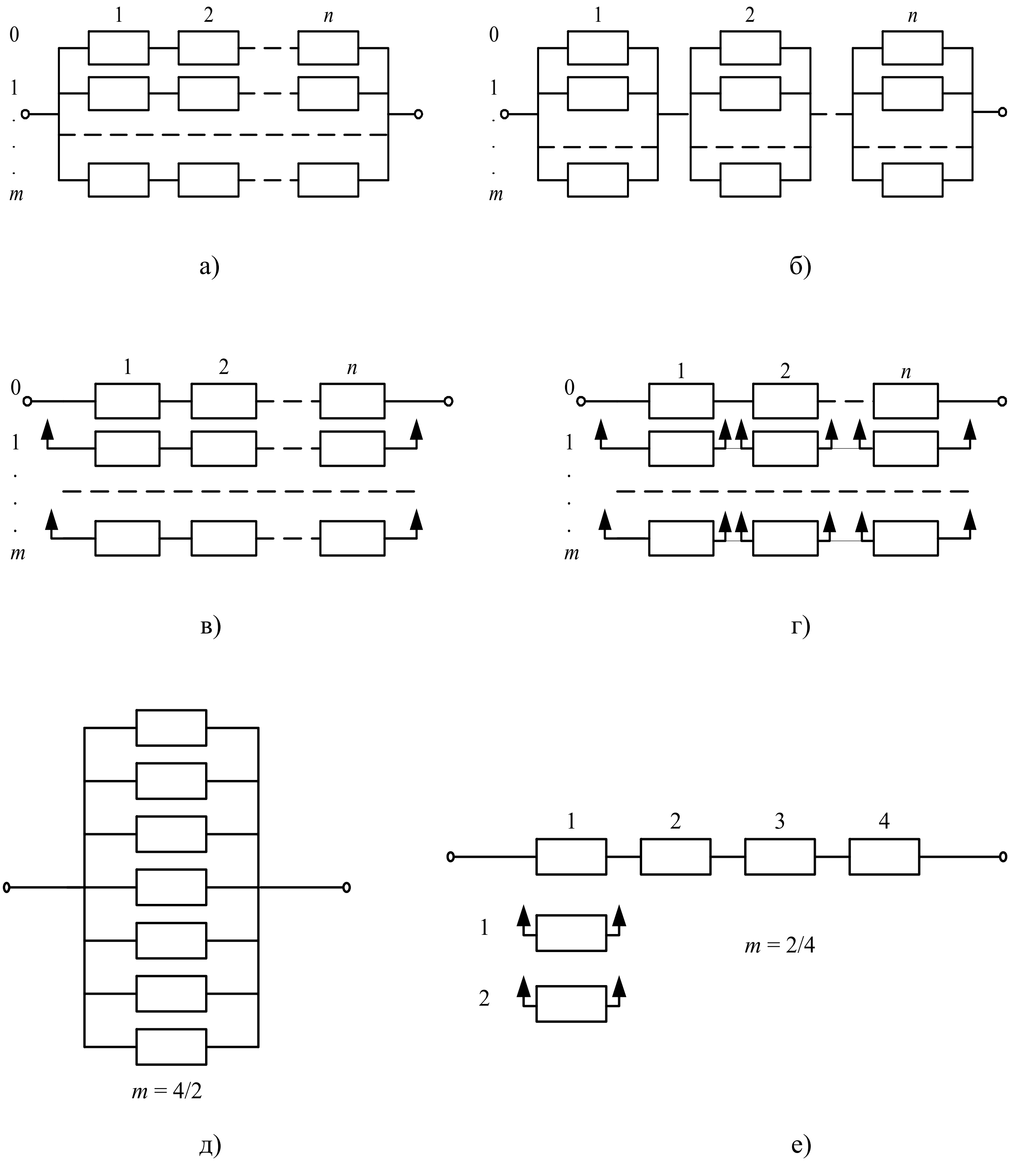


Рис. 3.2. Схемные обозначения различных способов резервирования: а – общее постоянное с целой кратностью; б – раздельное постоянное с целой кратностью; в – общее замещением с целой кратностью; г – раздельное замещением с целой кратностью; д – общее постоянное с дробной кратностью; е – раздельное замещением с дробной кратностью

Различают резервирование с целой и дробной кратностью. Схемные обозначения обоих видов резервирования при постоянном включении резерва одинаковы. Для их различия на схеме указывается кратность резервирования m.

При резервировании с целой кратностью величина m есть целое число, при резервировании с дробной кратностью величина m есть дробное несокращаемое число. Например, $m = 4/2$ означает наличие резервирования с дробной кратностью, при котором число резервированных элементов равно четырем, число основных – двум, а общее число элементов равно шести. Сокращать дробь нельзя, так как если $m = 4/2 = 2$, то это означает, что имеет место резервирование с целой кратностью, при котором число резервных элементов равно двум, а общее число элементов равно трем.

По способу включения резервирование разделяется на постоянное и резервирование замещением. Постоянное резервирование – резервирование, при котором резервные изделия подключены к основным в течение всего времени работы и находятся в одинаковом с ними режиме. Резервирование замещением – резервирование, при котором резервные изделия замещают основные после их отказа.

При включении резерва по способу замещения резервные элементы до момента включения в работу могут находиться в трех состояниях:

– нагруженном резерве;
– облегченном резерве;
– ненагруженном резерве.

Приведем основные расчетные формулы для указанных выше видов резервирования.

1. Общее резервирование с постоянно включенным резервом и с целой кратностью (см. рис. 3.2, *а*)

$$P_{\text{с}}(t) = 1 - \left[1 - \prod_{i=1}^{n} p_i(t)\right]^{m+1}, \tag{3.1}$$

где $p_i(t)$ – вероятность безотказной работы i-го элемента в течение времени t; n – число элементов основной или любой резервной цепи; m – число резервных цепей (кратность резервирования).

При экспоненциальном законе надежности, когда $p_i(t) = e^{-\lambda_i t}$,

$$P_{\text{с}}(t)=1-\left[1-e^{-\lambda_0 t}\right]^{m+1},$$

$$T_{\text{ср.с}}=\frac{1}{\lambda_0}\sum_{i=0}^{m}\frac{1}{i+1}=T_{\text{ср.0}}\sum_{i=0}^{m}\frac{1}{i+1}, \tag{3.2}$$

где $\lambda_0=\sum_{i=1}^{n}\lambda_i$ – интенсивность отказов нерезервированной системы или любой из m резервных систем; $T_{\text{ср.0}}$ – среднее время безотказной работы нерезервированной системы или любой из m резервных систем. При резервировании неравнонадежных изделий

$$P_{\text{с}}(t)=1-\prod_{i=0}^{m}q_i(t)=1-\prod_{i=0}^{m}\left[1-p_i(t)\right], \tag{3.3}$$

где $q_i(t)$, $p_i(t)$ – вероятность отказов и вероятность безотказной работы в течение времени t i-го изделия соответственно.

2. Раздельное резервирование с постоянно включенным резервом и с целой кратностью (см. рис. 3.2, *б*)

$$P_{\text{с}}(t)=\prod_{i=1}^{n}\left\{1-\left[1-p_i(t)\right]^{m_i+1}\right\}, \tag{3.4}$$

где $p_i(t)$ – вероятность безотказной работы i-го элемента; m_i – кратность резервирования i-го элемента; n – число элементов основной системы.

При экспоненциальном законе надежности, когда $p_i(t)=e^{-\lambda_i t}$,

$$P_{\text{с}}(t)=\prod_{i=1}^{n}\left\{1-\left[1-e^{-\lambda_i t}\right]^{m_i+1}\right\}. \tag{3.5}$$

При равнонадежных элементах и одинаковой кратности их резервирования

$$P_{\text{с}}(t)=\left\{1-\left[1-e^{-\lambda t}\right]^{m+1}\right\}^{n}, \tag{3.6}$$

$$T_{\text{ср.с}}=\int_0^{\infty}P_{\text{с}}(t)dt=\frac{(n-1)!}{\lambda(m+1)}\sum_{i=0}^{m}\frac{1}{v_i(v_i+1)...(v_i+n-1)}, \tag{3.7}$$

где $v_i=(i+1)/(m+1)$.

3. Общее резервирование замещением с целой кратностью (рис. 3.2 *в*)

$$P_{m+1}(t) = p_m(t) + \int_0^t P(t-\tau) a_m(\tau) d\tau, \qquad (3.8)$$

где $P_{m+1}(t)$, $P_m(t)$ – вероятности безотказной работы резервированной системы кратности m+1 и m соответственно; $P(t-\tau)$ – вероятность безотказной работы основной системы в течение времени $(t-\tau)$; $a_m(\tau)$ – частота отказов резервированной системы кратности m в момент времени τ.

Рекуррентная формула (3.8) позволяет получить расчетные соотношения для устройств любой кратности резервирования. Для получения таких формул необходимо выполнить интегрирование в правой части, подставив вместо $P(t-\tau)$ и $a_m(\tau)$ их значения в соответствии с выбранным законом распределения и состоянием резерва.

При экспоненциальном законе надежности и ненагруженном состоянии резерва

$$P_{\text{с}}(t) = e^{-\lambda_0 t} \sum_{i=0}^{m} \frac{(\lambda_0 t)^i}{i!}, \qquad (3.9)$$

$$T_{\text{ср.с}} = T_{\text{ср.0}}(m+1), \qquad (3.10)$$

где λ_0, $T_{\text{ср.0}}$ – интенсивность отказов и средняя наработка до первого отказа основного (нерезервированного) устройства.

При экспоненциальном законе надежности и ненагруженном состоянии резерва

$$P_{\text{с}}(t) = e^{-\lambda_0 t} \left[1 + \sum_{i=1}^{m} \frac{a_i}{i!} (1 - e^{-\lambda_i t})^i \right], \qquad (3.11)$$

$$T_{\text{ср.с}} = \frac{1}{\lambda_0} \sum_{i=0}^{m} \frac{1}{1+ik}, \qquad (3.12)$$

где $a_i = \prod_{j=0}^{i-1} (j + \frac{\lambda_0}{\lambda_1})$; $k = \frac{\lambda_1}{\lambda_0}$; λ_1 – интенсивность отказов резервного устройства до замещения.

При нагруженном состоянии резерва формулы для $P_\text{с}(t)$ и $T_\text{ср.с}$ совпадают с (3.2).

4. Раздельное резервирование замещением с целой кратностью (рис. 3.2, *г*)

$$P_\text{с}(t) = \prod_{i=1}^{n} p_i(t), \tag{3.13}$$

где $p_i(t)$ – вероятность безотказной работы системы из-за отказов элементов i-го типа, резервированных по способу замещения. Вычисляется $p_i(t)$ по формулам общего резервирования замещением (формулы (3.8), (3.9), (3.11)).

5. Общее резервирование с дробной кратностью и постоянно включенным резервом (рис. 3.2, *д*)

$$P_\text{с}(t) = \sum_{i=0}^{l-h} C_l^i p^{l-i}(t) \sum_{j=0}^{i} (-1)^j C_l^j p_0^j(t), \tag{3.14}$$

$$T_\text{ср.с} = \frac{1}{\lambda_0} \sum_{i=0}^{l-h} \frac{1}{h+i}, \tag{3.15}$$

где $p_0(t)$ – вероятность безотказной работы основного или любого резервного элемента; l – общее число основных и резервных систем; h – число систем, необходимых для нормальной работы резервированной системы.

В данном случае кратность резервирования

$$m = (l-h)/h. \tag{3.16}$$

6. Скользящее резервирование

$$P_\text{с}(t) = p^n(t) + np^{n-1}(t)\int_0^t a(\tau)p(t-\tau)d\tau + n^2 p^{-1}(t)\int_0^t a(\tau)\left\{\int_0^{t-\tau} a(\tau_1)p(t-\tau^1)d\tau_1\right\}d\tau + \ldots +$$

$$+ n^{m_0} p^{n-1}\int_0^t a(\tau)\left\{\int_0^{t-\tau} a(\tau_1)\left\{\int_0^{t-\tau^1} a(\tau_2)\ldots\left\{\int_0^{t-\tau^{(m_0-2)}} a(\tau_{m_0-1})p(t-\tau^{m_0-1})d\tau_{m_0-1}\right\}\ldots\right\}d\tau_1\right\}d\tau, \tag{3.17}$$

где $\tau^{1} = \tau + \tau_1; \tau^{11} = \tau + \tau_1 + \tau_2 ...; \tau^{m_0-1} = \tau + \tau_1 + ... + \tau_{m_0-1}$; n – число элементов основной системы; m_0 – число резервных элементов; $p(t - t_i)$ – вероятность безотказной работы одного элемента в течение времен $t - t_i$; $t_i = t, t-\tau, t-\tau^{m_0-1}$; $a(\tau_i)$ – частота отказов одного из основных элементов в момент времени τ_i

$$\tau_i = \tau, \tau_1, ..., \tau_{m_0-1}.$$

При экспоненциальном законе надежности

$$P_{\text{с}}(t) = e^{-n\lambda t}\left[1 + n\lambda t\right] + \frac{(n\lambda t)^2}{2!} + ... + \frac{(n\lambda t)^{m_0}}{m_0!} = e^{-n\lambda t}\sum_{i=0}^{m_0}\frac{(n\lambda t)^i}{i!} = e^{-\lambda_0 t}\sum_{i=0}^{m_0}\frac{(\lambda_0 t)^i}{i!}; \quad (3.18)$$

$$T_{\text{ср.с}} = T_{\text{ср.0}}(m_0 + 1),$$

где $\lambda_0 = n\lambda$ – интенсивность отказов нерезервированной системы; λ – интенсивность отказов элемента; n – число элементов основной системы; $T_{\text{ср.0}}$ – среднее время безотказной работы нерезервированной системы; m_0 – число резервных элементов.

В этом случае кратность резервирования

$$m = m_0 / n. \quad (3.19)$$

Приведенные выше формулы, кроме выражений (3.8), (3.11), (3.12), могут быть использованы только в тех случаях, когда справедливо допущение об отсутствии последствия отказов. Последствие отказов имеет место практически всегда при постоянном включении резерва, а также в случае резервирования замещением при недогруженном состоянии резерва.

Выражение (3.8) считается основным при получении расчетных формул в случае учета влияния последствия отказов. При этом члены $p(t-\tau)$ и $a_m(\tau)$ должны быть записаны с учетом последствия отказов, вида резервирования и его кратности.

Элементы резервированных устройств в ряде случаев могут иметь два вида отказов – «обрыв» и «короткое замыкание». В этом случае вычислять вероятность безотказной работы следует, суммируя вероятности всех благоприятных (не приводящих к отказу) гипотез, т. е.

$$P_c(t)=\sum_{j=1}^{k}p_j(t)\,, \qquad (3.20)$$

где $p_j(t)$ – вероятность j-й благоприятной гипотезы, вычисленной с учетом двух видов отказов; k – число благоприятных гипотез.

При вычислениях $p_j(t)$ следует иметь в виду, что для элементов сложной системы справедливы выражения

$$p(t)=\exp\left[-\int_0^t\lambda(t)dt\right],\quad \varphi_0+\varphi_a=1\,, \qquad (3.21)$$

где $\lambda(t)$ – интенсивность отказов элемента; φ_0,φ_a – вероятность возникновения «обрыва» и «короткого замыкания» соответственно.

При экспоненциальном законе надежности

$$p(t)=e^{-\lambda t},\varphi_a=\frac{\lambda_a}{\lambda_0+\lambda_a},\quad \varphi_0=\frac{\lambda_0}{\lambda_0+\lambda_a}\,, \qquad (3.22)$$

где λ_0,λ_a – интенсивность отказов элемента по «обрыву» и «короткому замыканию» соответственно.

Остальные количественные характеристики надежности в случае необходимости вычисляются через $P_c(t)$ по известным аналитическим зависимостям, приведенным в подразд. 1.

Расчет надежности резервированных систем иногда полезно выполнять, используя схему «гибели» («чистого размножения»). В соответствии с этой схемой преобразование Лапласа вероятности возникновения n отказов вычисляется по формуле

$$P_n(s)=\frac{\lambda_0\lambda_1\lambda_2\ldots\lambda_{n-1}}{(s-\lambda_0)(s+\lambda_1)\ldots(s+\lambda_n)}\,. \qquad (3.23)$$

При неравных корнях знаменателя обратное преобразование Лапласа $P_n(t)$ будет

$$P_n(t)=\lambda_0\lambda_1\ldots\lambda_{n-1}\sum_{k=0}^{n}\frac{e^{s_k t}}{B'(s_k)}\,. \qquad (3.24)$$

В формулах (3.23) и (3.24) приняты обозначения: λ_0 – интенсивность отказов системы до выхода из строя первого элемента; λ_1 – интенсивность отказов системы в промежутке времени от момента отказа первого элемента до второго; λ_2 – интенсивность отказов системы в промежутке времени от момента отказа второго до третьего и т. д.; n – число отказавших элементов; $s_k = -\lambda_k$ – k-й корень знаменателя выражения (3.23); $B'(s_k)$ – производная знаменателя в точке s_k.

При одинаковых опасностях отказов λ_i, т. е. $\lambda_0 = \lambda_1 = ... = \lambda_n$, расчетные формулы имеют вид

$$P_n(s) = \frac{\lambda_0^n}{(s+\lambda_0)^{n+1}}, \quad P_n(t) = \frac{(\lambda_0 t)^n}{n!} e^{-\lambda_0 t}. \tag{3.25}$$

При расчетах надежности по формулам (3.23) – (3.25) следует помнить, что они не определяют безотказность работы (или вероятности отказа) резервированной системы, а определяют лишь вероятность n-го состояния системы, т.е. вероятность того, что в системе окажутся n элементов. Для вычисления вероятности безотказной работы необходимо находить вероятности 0, 1, …, n отказов, когда система еще находится в работоспособном состоянии (исправна), и суммировать полученные вероятности.

Среднее время безотказной работы системы при использовании схемы «гибели» вычисляется по формуле

$$T_{\text{ср.с}} = \sum_{i=0}^{n-1} \frac{1}{\lambda_i}, \tag{3.26}$$

где λ_i – интенсивность отказов системы до выхода из строя i-го элемента.

При схемной реализации резервирования в ряде случаев конкретные технические решения не приводятся к логическим схемам расчета надежности.

При анализе надежности резервированных устройств на этапе проектирования приходится сравнивать различные схемные решения. В этом случае за критерий качества резервирования принимается выигрыш надежности. Выигрышем надежности называется отношение количественной характеристики надежности резервированного устройства к той же количественной характеристике нерезервированного устройства или устройства с другим видом резервирования.

Наиболее часто используются следующие критерии качества резервированных устройств: $G_q(t)$ – выигрыш надежности в течение времени t по вероятности отказов; $G_p(t)$ – выигрыш надежности в течение времени t по вероятности безотказной работы; G_T – выигрыш надежности по среднему времени безотказной работы.

При резервировании элементов электроники (резисторов, конденсаторов, контактов реле, диодов и т. п.) всегда произведение интенсивности отказов элемента на время его работы значительно меньше единицы, т. е. $\lambda t \ll 1$. Поэтому при вычислении $G_q(t)$ и $G_p(t)$ целесообразно функции вида $e^{-k\lambda t}$ (экспоненциальный случай) разложить в ряд:

$$e^{-k\lambda t} = 1 - k\lambda t + \frac{k^2\lambda^2 t^2}{2!} \text{ (при небольшом } k\text{).}$$

Если система исправна при отказе m элементов, то необходимо брать не менее чем m+2 членов разложения.

3.2. Типовые примеры и их решение

Пример 3.1. Дана система, схема расчета надежности которой изображена на рис. 3.3. Необходимо найти вероятность безотказной работы системы при известных вероятностях безотказной работы ее элементов (значения вероятностей указаны на рисунке).

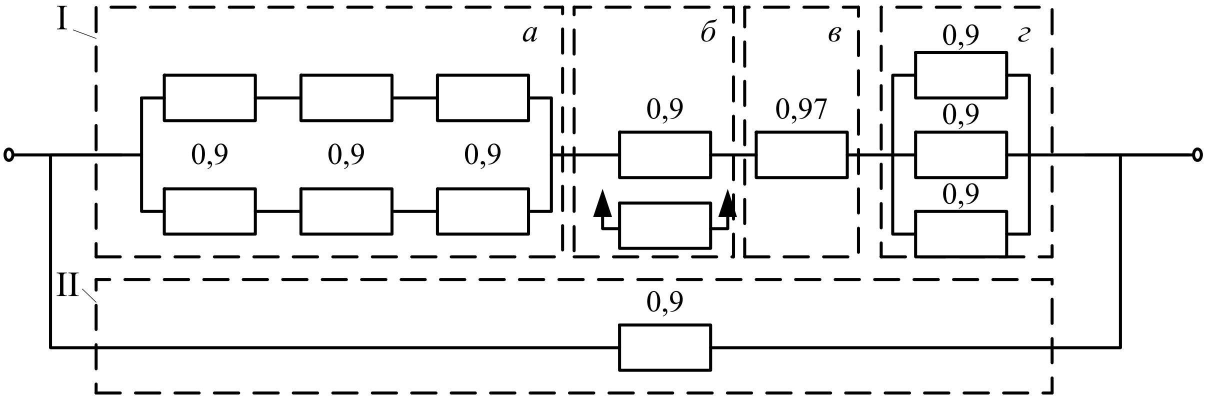


Рис. 3.3. Схема расчета надежности (к примеру 3.1)

Решение. Из рис. 3.3 видно, что система состоит из двух (I и II) неравнонадежных устройств.

Устройство I состоит из четырех узлов:

а – дублированного узла с постоянно включенным резервом, причем каждая часть узла состоит из трех последовательно соединенных (в смысле надежности) элементов расчета;

б – дублированного узла по способу замещения;

в – узла с одним нерезервированным элементом;

г – резервированного узла с кратностью $m = 1/2$ (схема группирования).

Устройство II представляет собой нерезервированное устройство, надежность которого известна. Так как оба устройства неравнонадежны, то на основании формулы (3.3) имеем

$$P_{\text{с}}(t) = 1 - \prod_{i=o}^{m}[1 - p_i(t)] = 1 - [1 - p_{\text{I}}(t)][1 - p_{\text{II}}(t)].$$

Найдем вероятность $p_{\text{I}}(t)$. Вероятность безотказной работы устройства I равна произведению вероятностей безотказной работы всех узлов, т. е. $p_{\text{I}} = p_а p_б p_в p_г$.

В узле *а* число элементов основной и резервной цепи $n = 3$, а кратность резервирования $m = 1$. Тогда на основании формулы (3.1)

$$p_a = 1 - \left[1 - \prod_{i=1}^{3} p_i(t)\right] = 1 - [1 - 0{,}9^3]^2 \approx 0{,}93.$$

В узле *б* кратность общего резервирования замещением $m = 1$, тогда на основании формулы (3.9) имеем

$$p_б(t) = e^{-\lambda_0 t}\sum_{i=0}^{m}\frac{(\lambda_0 t)^i}{i!} = e^{-\lambda_0 t}(1 + \lambda_0 t) \approx 0{,}9(1 + 0{,}1) = 0{,}99.$$

В узле *г* применено резервирование с дробной кратностью, когда общее число основных и резервных систем $l = 3$, число систем, необходимых для нормальной работы, $h = 2$. Тогда на основании формулы (3.14)

$$p_г = \sum_{i=0}^{l-h} C_l^i p_0^{l-i} \sum_{j=0}^{i}(-1)^j C_i^j p_0^j = \sum_{i=0}^{1} C_3^i p_0^{3-i} \sum_{j=0}^{i}(-1)^j C_i^j p_0^j =$$

$$= 3p_0^2 - 2p_0^3 = 3(0{,}9)^2 - 2(0{,}9)^3 = 0{,}972.$$

Вероятность безотказной работы устройства I

$$p_{\text{I}} = p_а p_б p_в p_г = 0{,}93 \cdot 0{,}99 \cdot 0{,}97 \cdot 0{,}972 \approx 0{,}868.$$

Тогда вероятность безотказной работы резервированной системы будет

$$P_c = 1(1 - p_{\text{I}})(1 - p_{\text{II}}) = 1 - (1 - 0{,}868)(1 - 0{,}9) = 0{,}987.$$

Пример 3.2. Для повышения надежности усилителя все его элементы дублированы. Предполагается, что элементы подвержены лишь одному виду отказов и последействие отказов отсутствует. Необходимо найти вероятность безотказной работы усилителя в течение $t = 5000$ ч. Состав элементов нерезервированного усилителя и данные по интенсивности отказов элементов приведены в таблице.

Решение. В нашем случае имеет место раздельное резервирование с кратностью $m_i = 1$, число элементов нерезервированного усилителя $n = 11$.

Данные по интенсивности отказов элементов (к примеру 3.2)

Элементы	Количество элементов	Интенсивность отказов элемента λ, 10^{-5} 1/ч
Транзисторы	1	2,16
Резисторы	5	0,23
Конденсаторы	3	0,32
Диоды	1	0,78
Катушки индуктивности	1	0,09

Тогда, используя данные таблицы, на основании формулы (3.5) получим:

$$P_{\text{с}}(5000) = \prod_{i=1}^{11}\{1-[1-e^{-\lambda_i 5000}]^2\}.$$

Так как λ_i<<1, то для приближенного вычисления показательную функцию можно разложить в ряд и ограничиться первыми двумя членами разложения $1-e^{-5000\lambda_i} \approx 50000\,\lambda_i$. Тогда

$$P_{\text{с}}(5000) \approx \prod_{i=1}^{11}[1-(1-5000\lambda_i)^2] \approx 1-\sum_{i=1}^{11}(5000\lambda_i)^2 =$$

$$= 1-5000^2\sum_{i=1}^{11}\lambda_i^2 = 1-25\cdot 10^4[2{,}16^2+5\cdot 0{,}23^2+$$

$$+3\cdot 0{,}32^2+0{,}78^2+0{,}09^2]10^{-10} \approx 0{,}985.$$

Пример 3.3. Система электроснабжения состоит из четырех генераторов, номинальная мощность каждого из которых W=18 кВт. Безаварийная работа еще возможна, если система электроснабжения может обеспечить потребителя мощностью 30 кВт. Необходимо определить вероятность безотказной работы системы электроснабжения в течение времени $t = 600$ ч, если интенсивность отказов каждого из генераторов $\lambda = 0{,}15\cdot 10^{-3}$ 1/ч. Необходимо также найти среднюю наработку до первого отказа системы электроснабжения.

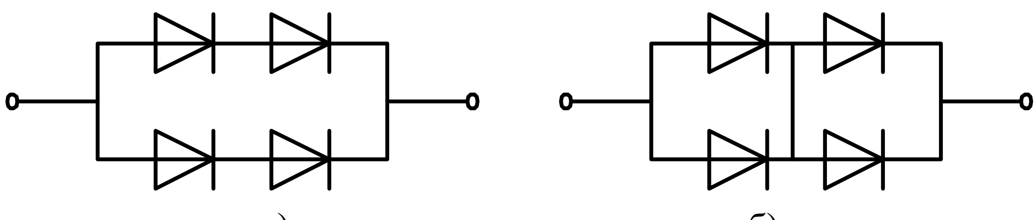
Решение. Мощности двух генераторов достаточно для питания потребителей, так как их суммарная мощность составляет 36 кВт, а по условию задачи достаточно лишь 30 кВт. Это значит, что отказ системы электроснабжения еще не наступит, если откажут один или два любых генератора. Здесь имеет место случай резервирования с дробной кратностью, когда общее число устройств $l = 4$, число устройств, необходимых для нормальной работы, $h = 2$, а кратность резервирования $m = 2/2$. На основании формулы (3.14)

$$P_{\text{с}}(t) = \sum_{i=0}^{2} C_4^i p_0^{4-i}(t) \sum_{i=0}^{i} (-1)^j C_i^j p_0^j(t) = 6p_0^2 - 8p_0^3 + 3p_0^4 = 6e^{-2\lambda t} - 8e^{-3\lambda t} + 3e^{-4\lambda t}.$$

Средняя наработка до первого отказа на основании формулы (3.15)

$$T_{\text{ср.с}} = \frac{1}{\lambda}\sum_{i=0}^{2}\frac{1}{2+i} = \frac{1}{\lambda}(\frac{1}{2}+\frac{1}{3}+\frac{1}{4}) = \frac{13}{12\lambda} = \frac{13}{12\cdot 0{,}15\cdot 10^{-3}} \approx 7220 \text{ ч.}$$

Пример 3.4. На рис. 3.4 изображены две схемы резервирования диодов. Известно, что интенсивность отказов диода λ=0,5·10^{-6} 1/ч, вероятность отказов типа «пробой» $\varphi_3 = 0{,}85$, а время непрерывной работы схемы $t = 5000$ ч. Предполагается, что последействие отказов отсутствует. Необходимо выяснить, какая схема лучше и какой выигрыш надежности по вероятности отказов она дает.



а)   б)

Рис. 3.4. Схемы резервирования диодов:
а – последовательно-параллельное соединение; б – параллельно-последовательное соединение

Решение. Найдем вероятность безотказной работы схем на рис. 3.4. Благоприятные ситуации схемы рис. 3.4, *а*, не приводящие к отказу, возникают в следующих случаях:

А – все диоды исправны; вероятность этой гипотезы равна $p^4(t)$;

Б – один любой диод отказал (либо обрыв, либо пробой), а остальные исправны; вероятность гипотезы равна $4q(t)p^3(t)$;

В – один любой диод отказал по обрыву, а другой по замыканию, остальные два диода исправны; вероятность гипотезы будет $12\varphi_0\varphi_3 q^2(t)p^2(t)$;

Г – два диода отказали по обрыву, а остальные исправны; вероятность гипотезы $2\varphi_0{}^2 q^2(t)p^2(t)$;

Д – два диода отказали по пробою, а остальные исправны; вероятность гипотезы $(C_4{}^2 - 2)\varphi_3{}^2 q^2(t)p^2(t) = 4\varphi_3{}^2 q^2(t)p^2(t)$;

Е – один диод исправен, два отказали по обрыву, а один – по пробою; вероятность гипотезы $4\varphi_0{}^2\varphi_3 q^3(t)p(t)$;

Ж – один диод исправен, два отказали по пробою, а один – по обрыву; вероятность гипотезы $8\varphi_0\varphi_3{}^2 q^3(t)p(t)$.

Суммируя вероятности гипотез, получим вероятность безотказной работы диодной схемы рис. 3.4, *а*:

$$P_А(t) = p^4(t) + 4q(t)p^3(t) + 12\varphi_0\varphi_3 q^2(t)p^2(t) + 2\varphi_0{}^2 q^2(t)p^2(t) + \\ + 4\varphi_3{}^2 q^2(t)p^2(t) + 4\varphi_0{}^2\varphi_3 q^3(t)p(t) + 8\varphi_0\varphi_3{}^2 q^3(t)p(t).$$

Подставляя значения φ_3 и $\varphi_0 = 1 - \varphi_3 = 1 - 0{,}85 = 0{,}15$, получаем:

$$P_А(t) = 0{,}5215p^4 - 2{,}0995p^3 + 1{,}6345p^2 + 0{,}9435p.$$

Схема рис. 3.4, *б* не откажет в тех же ситуациях, что и схема рис. 3.4, *а*, только число гипотез Г, Д, Е и Ж будет иное. Теперь вероятности этих гипотез будут иметь вид:

$4\varphi_0 2q^2(t)p^2(t)$ (гипотеза Г);

$2\varphi_3{}^2 q^2(t)p^2(t)$ (гипотеза Д);

$8\varphi_0{}^2\varphi_3 q^3(t)p(t)$ (гипотеза Е);

$4\varphi_0\varphi_3{}^2 q^3(t)p(t)$ (гипотеза Ж);

Тогда

$$P_Б(t) = p^4(t) + 4q(t)p^3(t) + 12\varphi_0\varphi_3 q^3(t)p^2(t) + 4\varphi_0{}^2 q^2(t)p^2(t) + \\ + 2\varphi_3{}^2 q^2(t)p^2(t) + 8\varphi_0{}^2\varphi_3 q^3(t)p(t) + 4\varphi_0\varphi_3{}^2 q^3(t)p(t) = -0{,}5215p^4 - \\ - 0{,}3705p^3 + 1{,}3055p^2 + 0{,}5865p.$$

Выигрыш надежности схемы рис. 3.4, *а* по сравнению со схемой рис. 3.4, *б* будет

$$G_q(t) = \frac{Q_A(t)}{Q_Б(t)} = \frac{1 - 0{,}5215p^4 + 2{,}0995p^3 - 1{,}6345p^2 - 0{,}9435p}{1 + 0{,}5215p^4 + 0{,}3705p^3 - 1{,}3055p^2 - 0{,}5865p}.$$

Найдем вероятность безотказной работы одного диода в течение 5000 ч работы

$$p(5000) = e^{-\lambda 5000} = e^{-0{,}5 \cdot 10^{-6} \cdot 5000} \approx 0{,}9975.$$

Подставляя значение $p(5000)$ в выражение для $G_q(t)$ и делая очевидные вычисления, получаем $G_q(5000) \approx 0{,}5$, т. е. схема рис. 3.4, *а* более выгодна, чем схема рис. 3.4, *б*, и число ее отказов в течение 5000 ч будет примерно в 2 раза меньше, чем схемы рис. 3.4, *б*.

3.3. Задачи

3.1. Схема расчета надежности приведена на рис. 3.5. Необходимо найти вероятность безотказной работы изделия, если известны вероятности отказов элементов.

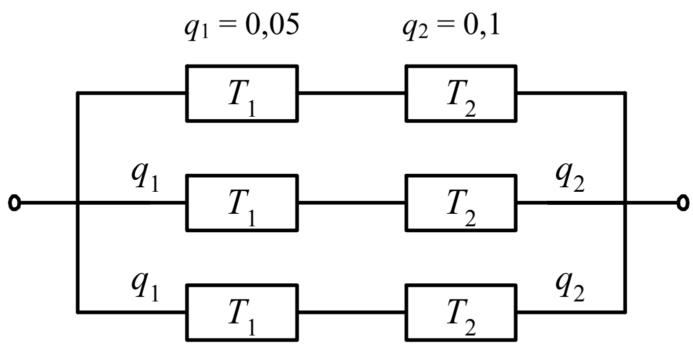


Рис. 3.5. Схема расчета надежности

3.2. Схема расчета надежности показана на рис. 3.6, где приведены данные о вероятностях безотказной работы элементов. Требуется определить вероятность безотказной работы P_c и вероятность отказа Q_c изделия.

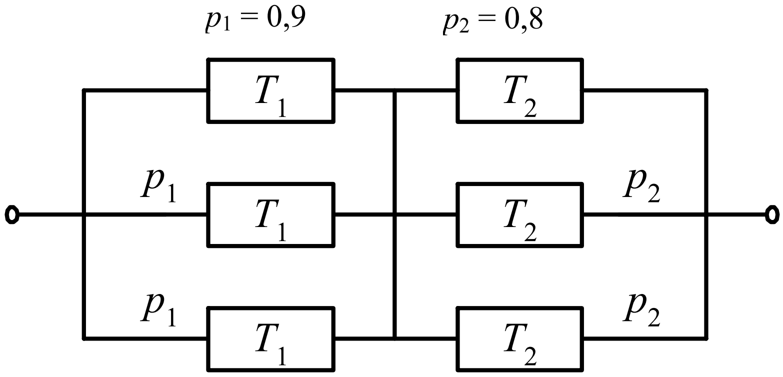


Рис. 3.6. Схема расчета надежности

3.3. Предложено конструктором три варианта схем построения изделия (рис. 3.7):

а) изделие нерезервировано и средние наработки до первого отказа элементов равны $T_1 = T_2 = 300$ ч;

б) один элемент дублируется путем замещения при ненагруженном состоянии резерва, а второй, как и в схеме рис. 3.7, *а*, нерезервирован, причем средние наработки до первого отказа дублированного узла и нерезервированного элемента те же;

в) один элемент дублирован путем постоянно включенного резерва, а второй нерезервирован, причем, как и в схемах рис. 3.7, *а* и *б*, средние наработки до первого отказа дублированного узла и нерезервированного элемента равны 300 ч.

Какой из вариантов более предпочтителен с точки зрения надежности, если надежность изделия оценивать средней наработкой до первого отказа?

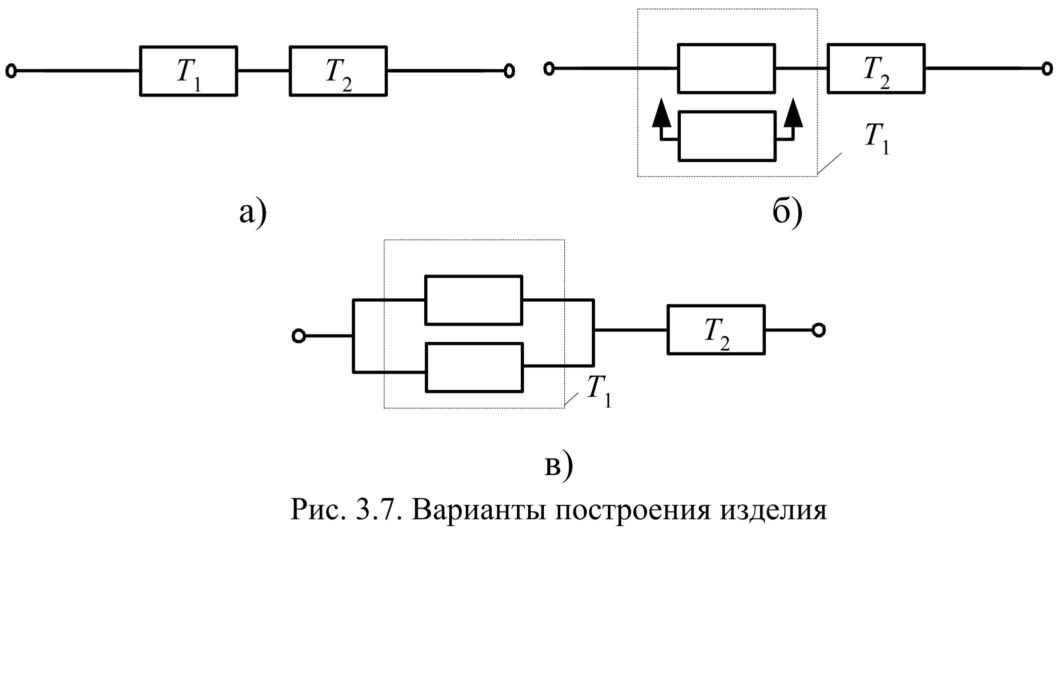


Рис. 3.7. Варианты построения изделия

3.4. Схема расчета надежности показана на рис. 3.8. Интенсивности отказов элементов имеют следующие значения: λ_1=0,3·10^{-3} 1/ч, λ_2=0,7·10^{-3} 1/ч. Необходимо определить вероятность безотказной работы изделия в течение времени t = 100 ч, среднюю наработку до первого отказа, частоту отказов и интенсивность отказов в момент времени t = 100 ч.

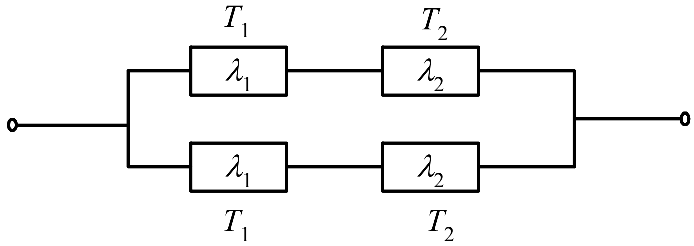


Рис. 3.8. Схема расчета надежности

3.5. Средние наработки до первого отказа элементов схемы рис 3.8 равны T_1 и T_2. Справедлив экспоненциальный закон надежности для элементов. Необходимо найти среднюю наработку до первого отказа схемы.

3.6. Интенсивность отказов изделия λ = 0,016 1/ч. Для повышения надежности имеется возможность либо облегчить режимы работы элементов и тем самым снизить интенсивность отказов изделия вдвое, либо дублировать изделие при постоянно включенном резерве без облегчения режимов работы элементов.

Какой способ более целесообразен, если надежность изделия оценивать средней наработкой до первого отказа?

3.7. Время непрерывной работы измерительной системы t = 100 ч. Какова должна быть интенсивность отказов устройства, чтобы схема группирования, примененная для повышения точности измерения, также способствовала повышению надежности системы?

3.8. Автомобильный двигатель имеет N = 4 свечи зажигания, по одной на каждый цилиндр. Интенсивность отказов свечи λ = 10^{-3} 1/ч, а длительность работы двигателя в течение всего путешествия t = 20 ч. Предполагается, что автомобиль может ехать также при одном неработающем цилиндре. Какова вероятность того, что автомобиль доставит туристов в пункт назначения без замены свечей?

3.9. Предложены следующие три системы электроснабжения промышленной сети:

а – один генератор мощностью 300000 кВт;

б – три генератора, каждый мощностью 100000 кВт;

в – пять генераторов, каждый мощностью 60000 кВт.

Какая система электроснабжения более надежна, если она не допускает восстановления и перерыва в работе и предназначена для непрерывной работы в течение $t = 1000$ ч? Интенсивности отказов генераторов растут пропорционально убыванию их мощности. Интенсивность отказов генератора мощностью 300000 кВт $\lambda = 3 \cdot 10^{-5}$ 1/ч. Предполагается, что в системе электроснабжения б допустим отказ одного генератора, а в системе электроснабжения в – двух генераторов. Предполагается также, что последействие отказов отсутствует.

3.10. Для повышения надежности схемы резисторы, имеющие сопротивление R, решено резервировать путем параллельного их соединения. Схема допускает изменение величины сопротивления не более чем на 25 %, поэтому для защиты схемы от одного отказа параллельно приходится включать не менее четырех резисторов. Необходимо определить выигрыш в надежности G_q схемы из четырех параллельно включенных резисторов по сравнению с одним нерезервированным резистором. Интенсивность отказов резистора $\lambda = 0{,}25 \cdot 10^{-6}$ 1/ч, а время непрерывной работы схемы $t = 40, 400, 4000$ ч.

3.11. Предложены следующие две схемы резервирования резисторов: а – три параллельно соединенных резистора; б – шесть параллельно соединенных резисторов. Обе схемы допускают изменение общего сопротивления на 1/3.

Какая схема более надежна, если интенсивность отказов одного резистора $\lambda = 0{,}5 \cdot 10^{-6}$ 1/ч, а время непрерывной работы $t = 40, 400, 4000$ ч? Сравнительную оценку провести по средней наработке до первого отказа и вероятности отказа, предположив, что последействие отказов отсутствует.

3.12. Для повышения надежности системы управления решено создать две системы, основанные на разных физических принципах, и применить дублирование замещением при ненагруженном резерве.

Интенсивности отказов систем имеют значения: $\lambda_1 = 0{,}4 \cdot 10^{-3}$ 1/ч, $\lambda_2 = 0{,}25 \cdot 10^{-2}$ 1/ч, а время непрерывной работы системы управления $t = 100$ ч. Какая из систем должна быть основной, а какая резервной, чтобы надежность всей резервированной системы управления была максимальной?

3.13. Схема расчета надежности изделия приведена на рис. 3.5. Требуется определить интенсивность отказов изделия при $t = 100$ ч, если интенсивности отказов элементов имеют следующие значения $\lambda_1 = 0{,}23 \cdot 10^{-3}$ 1/ч, $\lambda_2 = 0{,}17 \cdot 10^{-3}$ 1/ч.

3.14. Система электроснабжения самолета состоит из четырех параллельно работающих однотипных генераторов при отказе двух и более генераторов наступает отказ системы электроснабжения, так как мощности двух исправных генераторов недостаточно для питания всех потребителей и часть из них отключается. Интенсивность отказов генератора при всех исправных генераторах $\lambda = 0{,}25 \cdot 10^{-2}$ 1/ч, а при отказе одного из них $\lambda = 0{,}5 \cdot 10^{-2}$ 1/ч. Необходимо найти вероятность безотказной работы в течение времени полета $t = 8$ ч и среднюю наработку до первого отказа системы электроснабжения.

3.15. Система электроснабжения автомобиля состоит из генератора и аккумуляторной батареи. Без аккумуляторной батареи езда на автомобиле невозможна, так как нельзя запустить двигатель. При отказе генератора езда возможна в течение очень короткого времени (единиц часов). Известно, что интенсивность отказов генератора $\lambda = 0{,}25 \cdot 10^{-2}$ 1/ч; интенсивность отказов аккумуляторной батареи при параллельной работе с генератором $\lambda_2 = 0{,}15 \cdot 10^{-2}$ 1/ч, а при отказе генератора $\lambda_3 = 1{,}6 \cdot 10^{-2}$ 1/ч. Необходимо получить формулу для вероятности безотказной работы $P_c(t)$ системы электроснабжения и вычислить эту вероятность при $t = 2$ ч.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ястребенецкий, М. А. Надежность АСУТП : учеб. пособие для вузов / М. А. Ястребенецкий, Г. М. Иванова. – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 264 с.
2. Шураков, В. В. Надежность программного обеспечения систем обработки данных : учеб. для вузов / В. В. Шураков. – М. : Энергоатомиздат, 1986. –272 с.
3. Дружинин, Г. В. Надежность автоматизированных производственных систем / Г. В. Дружинин. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 480 с.
4. Острейковский, В. А. Теория надежности : учеб. для высш. учеб. заведений / В. А. Острейковский. – М. : Высш. шк., 2003. – 463 с.
5. Кубарев, А. И. Надежность машин, оборудования и приборов бытового назначения: учеб. для вузов / А. И. Кубарев, Е. А. Панфилов, Б. И. Хохлов – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Легпромбытиздат, 1987. – 335 с.
6. Диллон, Б. Инженерные методы обеспечения надежности / Б. Диллон, Ч. Сингх; под ред. Е. К. Масловского; пер. с англ. Е. Г. Коваленко. – М. : Мир, 1984. – 318 с.
7. Сборник задач по теории надежности / под ред. А. М. Половко и И. М. Маликова. – М. : Совет. радио, 1972. – 408 с.
8. Шор, Я. Б. Таблицы для анализа и контроля надежности / Я. Б. Шор, Ф. И. Кузьмин. – М. : Совет. радио, 1968. – 284 с.
9. Иыуду, К. А. Надежность, контроль и диагностика вычислительных машин и систем : учеб. пособие / К. А. Иыуду. – М. : Высш. шк., 1989. – 216 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ДИАГНОСТИКА И НАДЕЖНОСТЬ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ

Методические указания к практическим занятиям

Ч. 1. НАДЕЖНОСТЬ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ

Составители:
НАЗАРОВ Алексей Александрович
АЛАДЫШЕВ Сергей Федорович
КИРИЛИНА Анастасия Николаевна и др.

Ответственный за выпуск – зав. кафедрой профессор В. Ф. Коростелев

Редактор А.П. Володина
Технический редактор Н.В. Тупицына
Корректор Т.В. Климова
Компьютерная верстка Р.В. Яппарова

Подписано в печать 04.07.06.
Формат 60x84/16. Бумага для множит. техники. Гарнитура Таймс.
Печать на ризографе. Усл. печ. л. 3,25. Уч.-изд. л. 3,27. Тираж 100 экз.
Заказ .

Издательство
Владимирского государственного университета.

600000, Владимир, ул. Горького, 87.