Федеральное агентство по образованию

Государственное образовательное учреждение высшего и профессионального образования "Кемеровский технологический институт пищевой промышленности"

Кафедра автоматизации производственных процессов и АСУ

НАДЕЖНОСТЬ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

Учебно - методический комплект для студентов заочного обучения специальности «Автоматизация технологических процессов и производств».

Учебно — методический комплект для студентов заочного обучения спеуиальности 210200 — Автоматизация технологических процессов и производств по дисциплине «Диагностика и надежность автоматизированных систем».

Составители: к. т. н., доцент кафедры АПП и АСУ А. В. Чупин, ассистент кафедры АПП и АСУ А. А. Ямпольский.

Утверждено на заседании кафедры АПП и АСУ 26.06.2004 г., протокол №10.

Рекомендовано к печати методической комиссией заочного факультета.

Учебно методический комплект включает в себя рабочую программу дисциплины, варианты заданий и методические указания для выполнения контрольной работы, теоретические сведения по дисциплине «Диагностика и надежность автоматизированных систем».



Кемеровский технологический институт пищевой промышленности, 2004.

СОДЕРЖАНИЕ

1.	Раоочая программа по дисциплине «диагностика и надежность автоматизированных систем»	4
2.	Методические указания для выполнения контрольной работы	7
3.	Основные теоретические сведения по дисциплине «Диагностика и надежность автоматизированных систем»	•
3.1	Надежность: основные понятия и определения	15
3.2	Показатели надежности	17
3.2.1	Основные показатели безотказности изделий	18
3.2.2	Основные показатели долговечности	25
3.2.3	Основные показатели ремонтопригодности	26
3.2.4	Комплексные показатели надежности	28
3.3	Основные математические модели, наиболее часто используемые в расчетах надежности	
3.4	Надежность невосстанавливаемой системы при основном соединении элементов	
3.5	Порядок решения задач надежности	45
3.6	Надежность невосстанавливаемых резервированных систем	4.0
3.7	Надежность восстанавливаемых систем	61
3.8	Анализ показателей надежности по экспериментальным данным	72
4.	Техническое диагностирование автоматизированных систем	80
4.1	Методологические основы технического диагностирования	80
4.2	Методы организации поиска отказавших элементов при их основном соединении	84
4.3	Принципы детерминированного поиска дефекта	88
5.	Контрольные вопросы	100

1. РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ "ДИАГНОСТИКА И НАДЕЖНОСТЬ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ"

1.1 Цель преподавания дисциплины

Цель изучения дисциплины "Диагностика и надежность автоматизированных систем упрвления" заключается в формировании у студентов знаний и умений анализа и обеспечения надежности программно-технических средств и систем автоматизации.

В результате изучения дисциплины студенты должны знать:

- основные составляющие надежности и соответствующие функциональные и числовые показатели;
- методы расчета надежности технических и программных систем;
- способы оценивания эффективности сложных программно-технических систем автоматизации;
- способы обеспечения заданного уровня надежности программно-технических систем автоматизации;
- способы планирования и проведения испытаний и наблюдений для определения показателей надежности.

Уметь:

- оценивать по экспериментальным данным показатели надежности технических и программных средств;
- анализировать надежность восстанавливаемых и невосстанавливаемых систем;
- синтезировать простые технические системы с заданным уровнем надежности.

Изучение дисциплины "Диагностика и надежность автоматизированных систем управления" базируется на учебном материале следующих курсов: "Математика" (линейная алгебра, дифференциальное и интегральное исчисление, линейные дифференциальные уравнения, теория вероятностей и математическая статистика), "Технические средства автоматизации", "Технологические измерения и приборы".

Знания и умения, полученные при освоении курса "Диагностика и надежность автоматизированных систем упарвления", используются при изучении курсов "Проектирование систем управления", "Автоматизация технологических процессов и производств", а также в курсовом и дипломном проектировании.

1.2 Содержание дисциплины

Раздел 1. Общие сведения о надежности

Проблема надежности в технике, технологиях, автоматике. Задачи, решаемые теорией надежности, математический аппарат теории надежности.

Понятие технического элемента, системы. Понятие отказа элемента (системы), классификация отказов. Надежность и ее составляющие: безотказность, восстанавливаемость (ремонтопригодность), сохраняемость и долговечность.

Значимость составляющих надежности для технических средств автоматизации.

Функциональные показатели надежности: вероятность безотказной работы и восстановления за заданное время, плотность и интенсивность отказов и восстановления, функция готовности. Числовые показатели надежности: средняя наработка на отказ и восстановления, гамма - процентный ресурс (гарантированный ресурс). Срок сохраняемости, коэффициент готовности и др.

Теоретические законы безотказности и восстанавливаемости: экспоненциальный, нормальный, усеченный нормальный, логарифмически нормальный, Вейбулла. Параметры законов и их связь с числовыми показателями надежности.

Раздел 2. Надежность безызбыточных невосстанавливаемых систем при основном соединении элементов

Понятие основного и избыточного (резервного) элемента. Основное соединение элементов. Структурные надежностные схемы безызбыточных систем. Определение показателей надежности нерезервированной системы по известным характеристикам надежности основных элементов.

Методы повышения надежности нерезервированной системы: упрощение схем, замена самых "ненадежных" элементов, повышение качества всех элементов.

Раздел 3. Надежность систем с резервированием и восстановлением

Резервирование в технических системах и его виды: постоянное, скользящее, замещением; нагруженное, частично нагруженное, ненагруженное; групповое и индивидуальное; одно-, дробно- и многократное; мажоритарное. Структурные надежностные схемы для различных видов резервирования.

Методы расчета надежности резервированных невосстанавливаемых систем по известным характеристикам элементов.

Показатели эффективности резервирования, способы их определения.

Анализ надежности резервированных восстанавливаемых систем. Описание восстанавливаемых систем марковским случайным процессом с непрерывным временем и дискретными состояниями. Уравнения Колмогорова, методы их решения для определения: функций и коэффициентов готовности системы или средней наработки на отказ.

Раздел 4. Синтез резервированных систем с оптимальным уровнем надежности

Постановка задачи синтеза резервированной системы с оптимальным или заданным уровнем надежности: критерии оптимальности, управления, связи, ограничения. Методы решения комбинаторных оптимизационных задач на условный экстремум: динамическое программирование, ветвей и границ, целочисленное нелинейное программирование и др.

Оптимизационные задачи профилактического обслуживания технических систем.

Раздел 5. Надежность программных средств и систем

Понятие "отказа" программы, программного обеспечения (ПО). Классификация отказов ПО; ошибки в программах как источник отказа ПО. Класси-

фикация ошибок, анализ распределения ошибок по стадиям создания ПО. Способы и приемы выявления и устранения ошибок в ПО на стадиях разработки спецификаций, проектирования, реализации.

Функциональные и числовые характеристики безотказности и восстанавливаемости нерезервированных программных средств и систем. Зависимость показателей надежности программных средств от числа ошибок в программах. Оценивание числа ошибок в ПО на стадии сопровождения.

Резервирование программных средств и систем. Виды резервирования: временное, информационное, программное, программно-аппаратурное.

Раздел 6. Оценка показателей надежности технических средств и систем

Определительные испытания на надежность. Планирование и проведение испытаний, методы обработки экспериментальных данных при определении статистических распределений и точечных и интервальных оценок числовых показателей надежности. Форсированные испытания на надежность. Методика их проведения и обработки данных.

Контрольные испытания технических средств и систем. Понятие ошибок первого и второго рода, риска изготовителя и пользователя. Тактика последовательного экспериментирования с целью обеспечения заданных рисков изготовителя и пользователя.

Определение оценок показателей надежности технических элементов и систем по результатам эксплуатации. Методы сбора данных о наработках между отказами и восстановлениями; оценивание показателей надежности; анализ влияния условий эксплуатации элементов и систем на оценки показателей надежности.

Раздел 7. Диагностика автоматизированных систем.

Диагностирование — средство повышения надежности на стадии эксплуатации. Методы диагностирования систем автоматизации, управления и программно-технических средств. Алгоритмы диагностирования.

1.3 Перечень практических занятий

№ занятия	Наименование	Время выполнения
1	Расчет показателей надежности невосстанавливаемых систем при различных способах резервирования.	Установочная сессия
2	Определение показателей надежности одно- и много- контурных САР	Установочная сессия
3	Расчет надежности схем сигнализации и защиты оборудования	Установочная сессия
4	Синтез резервированных систем с заданным уровнем надежности	Установочная сессия
5	Синтез измерительных каналов АСУ ТП с заданным уровнем надежности	Установочная сессия

1.4 Учебно-методические материалы по дисциплине

Основная и дополнительная литература

Порядковый номер и библиографическое опи-	Шифр биб-	Планируемое	Число			
сание рекомендуемого источника литературы	лиотеки	число студентов-	экзем-			
сание рекомендуемого источника литературы	КемТИПП	пользователей	пляров			
1	2	3	4			
Основная						
1. Ястребенецкий М.А., Иванова Г.М. Надеж-	658.52	40	5			
ность АСУТП: Учебное пособие. М.: Энерго-	Я 85					
атомиздат, 1989. 264 с.						
2. Дружинин Г.В. Надежность автоматизиро-	65 Д 76	40	3			
ванных производственных систем. М.: Энерго-						
атомиздат, 1986. 480 с.						
3. Глазунов Л. П., Грабовецкий В. П., Щерба-		40	-			
ков О. В. Основы теории надежности автома-						
тических систем управления. Л: Энергоиздат,						
1984. 208 c.						
4. htt: / nadegnost.narod.ru/all_lections.html		40	-			
КБГУ "Надежность <<АСОИ и У>>"						
5. Балакирев В. С. Электронный задачник по		40	-			
надежности систем управления. М.: МГУИЭ,						
2000.						
Дополнительная						
6. Надежность автоматических систем управ-	658.5	20	2			
ления. Учебное пособие для вузов. /Под ред.	H 17					
Автонян Н. О. М.: В. Ш., 1979. – 487 с.						

2. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ

2.1 Содержание контрольной работы и требования к ее оформлению

Контрольная работа по дисциплине «Диагностика и надежность автоматизированных систем» включает в себя решение трех задач по основным разделам теории надежности систем управления.

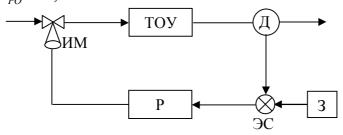
Номер варианта задания для выполнения контрольной работы студент получает на установочной сессии у преподавателя.

Контрольная работа выполняется в рукописном виде в ученической тетради или в напечатанном виде на листах формата А4 и должна включать в себя: номер варианта, задание на контрольную работу, три раздела и список использованной при выполнении контрольной работы литературы.

2.2 Варианты заданий для выполннеия контрольной работы

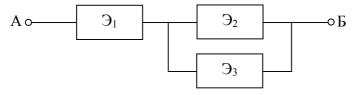
Вариант 1

- 1. Вероятность отказа элемента системы автоматизации в момент времени (500 дней) составляет 0,3. Определить среднюю наработку до отказа элемента САУ.
- 2. Автоматическая система регулирования состоит из шести элементов: датчик Д $\lambda_{\partial}=0{,}003$, задатчик З $\lambda_{\exists}=0{,}0015$, элемент сравнения ЭС $\lambda_{\exists C}=0{,}00075$, регулируюрений орган РО $\lambda_{PO}=0{,}0015$.



Определить среднюю наработку до отказа системы и вероятность отказа системы в момент времени t = 20 vac.

3. Техническая система состоит из трех равнонадежных элементов с интенсивностями отказов $\lambda = 0{,}009$; $\lambda = 0{,}0135$; $\lambda = 0{,}0045$, два из которых основные, а третий резервный.



Система исправна пока существует цепь АБ.

Определить среднюю наработку до отказа системы, вероятность отказа системы в момент времени 111 час.

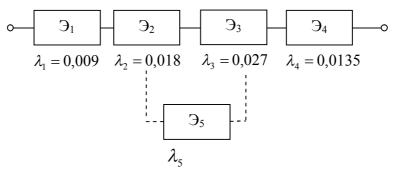
Вариант 2

- 1. Из 1000 одновременно включенных однотипных элементов к моменту времени 700 дней отказало 200 элементов. Найти оценки интенсивности отказа и средней наработки до отказа элемента САУ.
- 2. Регулятор с передаточной функцией $W(p) = C_1 + \frac{C_0}{p}$, где C_1, C_0 параметры настройки, состоит из трех элементов: усилителя с интенсивностью отказов $\lambda = 0,0022 vac^{-1}$; интегратора с $t_{\gamma} = 70$ час, при $P_{\gamma} = 0,8$; сумматора с $P_{\Sigma}(56) = 0,2$.

Составьте надежностную структурную схему регулятора, определите закон регулирования и среднюю наработку до отказа.

3. САУ состоит из четырех основных элементов $Э_1$ - $Э_4$ с интенсивностями отказов $\lambda_1=0{,}009\,uac^{-1};~\lambda_2=0{,}018\,uac^{-1};~\lambda_3=0{,}027\,uac^{-1};~\lambda_4=0{,}0135\,uac^{-1}$. В наличии имеется еще пятый элемент со средней наработкой до отказа $T_{cp}=30\,uac$, которым можно зарезервировать любой из основных.

Определите наибольшую среднюю наработку до отказа резервированной системы и вероятность её отказа в момент времени 100 часов.



Определите интенсивность отказов резервного элемента Э₅.

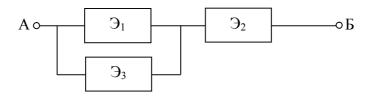
Определите наибольшую среднюю наработку до отказа всей резервированной системы и вероятность её отказа в момент времени $t = 100 \, uac$.

Вариант 3

1. Вероятность безотказной работы элемента изменилась в 1, 9 раза за время его эксплуатации 200 час. Определить гамма-ресурс элемента при $P_{\gamma}=0,38$. Определить параметр λ экспоненциального распределения $P(t)=e^{-\lambda \cdot t}$, при t=200 и $\frac{P(t_1)}{P(t_1+t)}=1,9$.

Можно использовать свойство P(0) = 1.

- 2. Усилитель напряжения состоит из трех последовательно включенных каскадов усиления K_1 , K_2 , K_3 с интенсивностями отказов $\lambda_1 = 0.001 \, uac^{-1}$; $\lambda_2 = 0.007 \, uac^{-1}$; $P_3(t) = 0.3$, где $t = 100 \, uac$. Определить среднюю наработку до отказа и гамма-ресурс готовности усилителя при $P_{\nu}(t) = 0.8$.
- 3. Техническая система сконструирована из трех равнонадежных элементов с интенсивностью отказов $\lambda=0{,}003$, два из которых основных, а третий резервный.

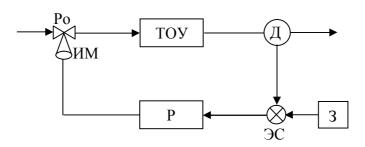


Система исправна, пока существует цепь АБ.

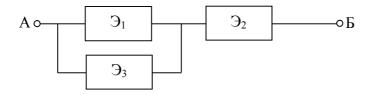
Определите среднюю наработку до отказа системы, вероятность отказа системы в момент времени 333 час.

Вариант 4

- 1. Плотность вероятности отказа изменилась в 1,7 раза за время эксплуатации элемента, равное 300 час. Определить среднюю наработку до отказа элемента и вероятность его отказа в момент времени 120 час.
- 2. Автоматическая система регулирования состоит из шести элементов: датчик Д $\lambda_{J} = 0,006$, задатчик З $\lambda_{3} = 0,0045$, элемент сравнения ЭС $\lambda_{2C} = 0,003$, регулятор Р $\lambda_{P} = 0,006$, исполнительный механизм ИМ $\lambda_{UM} = 0,0045$, регулирующий орган РО $\lambda_{PO} = 0,012$. Определить среднюю наработку до отказа системы.



3. Техническая система состоит из трех равнонадежных элементов с интенсивностями отказов $\lambda=0{,}006$, $\lambda=0{,}009$, $\lambda=0{,}003$, два из которых основных, а третий - резервный.

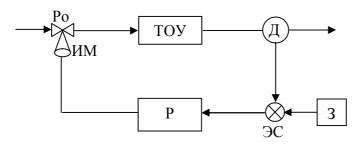


Система исправна, пока существует цепь АБ.

Определить среднюю наработку до отказа системы, вероятность отказа системы в момент времени 166 час.

Вариант 5

- 1. При испытаниях большого числа однотипных элементов в момент времени t_o было исправно 600 элементов, а на малом отрезке времени t_o , t_o+5 час отказало 2 элемента. Определите оценки средней наработки до отказа элемента и вероятности его отказа в момент времени 1200 час.
- 2. Автоматическая система регулирования состоит из шести элементов: датчик Д $\lambda_{_{\! /\!\! /}}=0,\!003$, задатчик З $\lambda_{_{\! /\!\! /}}=0,\!0015$, элемент сравнения ЭС $\lambda_{_{\! /\!\! /\!\! /}}=0,\!00075$, регулирую- р $\lambda_{_{\! /\!\! /\!\! /}}=0,\!006$, исполнительный механизм ИМ $\lambda_{_{\! /\!\! /\!\! /\!\! /}}=0,\!009$, регулирующий орган РО $\lambda_{_{\! /\!\! /\!\! /\!\! /\!\! /}}=0,\!015$.

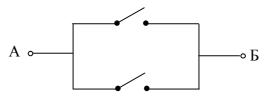


Определить среднюю наработку до отказа системы, вероятность отказа системы в момент времени $t = 20 \, uac$.

3. Сконструировать из равнонадежных элементов с интенсивностью отказов 0,002 резервированную систему минимальной сложности со средней наработкой до отказа не менее 989 час. Определите число элементов n в резервированной системе и её среднюю наработку до отказа.

Вариант 6

- 1. Вероятность безотказной работы элемента САУ изменилась в 1,4 раза за время его эксплуатации в течении $300\, uac$. Определить гамма-ресурс элемента при $P\gamma(t)=0,28$. Определить параметр λ распределения $P(t)=e^{-\lambda \cdot t}$ по известным $t=300\, uac$ и $\frac{P(t_1)}{P(t+t_1)}=1,4$.
- 2. Пусть вероятность отказа реле типа "обрыв" (несрабатывание) равна Q=0,4 .

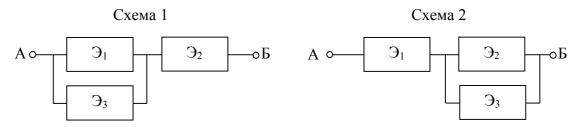


Определить вероятность отказа типа "обрыв" цепи ${\bf A}{\bf G}$ – системы из двух реле и коэффициент резервирования $K_Q=Q/Q_C$, где Q_C - вероятность отказа системы.

3. Сконструировать из равнонадежных элементов с интенсивностью отказов 0,009 резервированную систему минимальной сложности со средней наработкой до отказа не менее 241 час. Определите число элементов n в резервированной системе и её среднюю наработку до отказа.

Вариант 7

- 1. Технический элемент обладает гамма-ресурсом 600 час при гарантированном уровне надежности 0,7. Определить среднюю наработку до отказа элемента и плотность распределения при t=60 и при экспоненциальном законе распределения наработки до отказа.
- 2. В двух надежностных схемах применяются одни и те же элементы с соответствующими интенсивностями отказов $\lambda_1=0{,}005$, $\lambda_2=0{,}0075$, $\lambda_3=0{,}0025$.

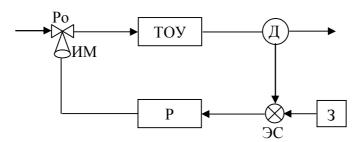


Определите количественную эффективность схемы 2 относительно схемы 1 по показателям T_c и Q_c .

3. Сконструировать резервированную систему минимальной сложности со средней наработкой до отказа не менее 580 дней, используя элементы с интенсивностями отказов $\lambda_1=0{,}008$, $\lambda_2=0{,}009$, $\lambda_3=0{,}0010$, $\lambda_4=0{,}0011$, $\lambda_5=0{,}0012$. Сколько элементов использовали в САУ? Чему равна средняя наработка до отказа?

Вариант 8

- 1. Вероятность отказа элемента САУ в момент времени 2000 *час* составляет 0,7. Определите среднюю наработку до отказа данного элемента.
- 2. Автоматическая система регулирования состоит из шести элементов: датчик Д $\lambda_{_{\! /}}=0,004$, задатчик З $\lambda_{_{\! /}}=0,001$, элемент сравнения ЭС $\lambda_{_{\! /}}=0,0008$, регулятор Р $\lambda_{_{\! /}}=0,006$, исполнительный механизм ИМ $\lambda_{_{\! /}}=0,01$, регулирующий орган РО $\lambda_{_{\! /}}=0,015$.



Определить среднюю наработку до отказа системы, вероятность отказа системы в момент времени $t = 200 \, uac$.

3. Сконструировать резервированную систему минимальной сложности со средней наработкой до отказа не менее 280 дней, используя элементы с интенсивностями отказов $\lambda_1=0{,}006$, $\lambda_2=0{,}009$, $\lambda_3=0{,}007$, $\lambda_4=0{,}009$, $\lambda_5=0{,}01$. Необходимо указать какие элементы были использованы в САУ и величину средней наработки до отказа.

Вариант 9

1. Из эксперимента известны наработки до первого отказа 16-ти однотипных невосстанавливаемых элементов t_j час: t_1 = 210; t_2 = 380; t_3 = 450; t_4 = 460; t_5 = 610; t_6 = 820; t_7 = 900; t_8 = 910; t_{10} = 1280; t_{11} = 1380; t_{12} = 1460; t_{13} = 1810; t_{14} = 2050; t_{15} = 2800; t_{16} = 3050. Определить оценки: средней наработки до отказа, дисперсии и среднего квадратического отклонения. Прове-

рить гипотезу об экспоненциальном распределении случайной величины T (наработки до отказа).

- 2. Система состоит из двух основных элементов с интенсивностями отказов 0,0012 и 0,0018 и одного общерезервного элемента с гамма-ресурсом $250\, uac$ при $P_{\gamma}=0.8$. Найти значение вероятности безотказной работы системы в момент времени $150\, uac$ и среднюю наработку до отказа системы. Общерезервный элемент предназначен для резервирования нескольких элементов.
- 3. Сконструировать резервированную систему минимальной сложности со средней наработкой до отказа не менее 310 дней, используя элементы с интенсивностями отказов $\lambda_1=0{,}005$, $\lambda_2=0{,}006$, $\lambda_3=0{,}007$, $\lambda_4=0{,}008$, $\lambda_5=0{,}009$. Определить число и номера элементов включенных в систему, среднюю наработку до отказа системы с данными элементами.

Вариант 10

- 1. При испытании 1000 однотипных элементов на интервале времени 455-565 дней отказало 11 элементов. Определить среднюю наработку до отказа и гаммаресурс элемента при $P_{\gamma}=0.9$.
- 2. Техническая система регулирования состоит из четырех основных элементов \Im_1 - \Im_4 с интенсивностями отказов $\lambda_1=0{,}008\,uac^{-1}$; $\lambda_2=0{,}0016\,uac^{-1}$; $\lambda_3=0{,}024\,uac^{-1}$; $\lambda_4=0{,}012\,uac^{-1}$. В наличии имеется ещё один элемент со средней наработкой до отказа $50\,uac$, которым можно зарезервировать любой из основных. Определить, какой из элементов \Im_1 - \Im_4 необходимо зарезервировать, чтобы получить наибольшую среднюю наработку до отказа системы и вероятность её отказа в момент времени $100\,uac$.
- 3. Вероятность отказа одного реле типа "обрыв" (несрабатывание) равна Q=0,2



Определить вероятность отказа типа "обрыв" цепи AБ – системы из двух реле и коэффициент резервирования $K_{\mathcal{Q}} = Q/Q_c$.

Вариант 11

- 1. Сравнить вероятность безотказной работы в течение наработки 5000-5100 часов двух элементов. Для каждого элемента характерно одинаковое распределение времени между соседними независимыми отказами. Первый элемент имеет экспоненциальное распределение времени между отказами с плотностью $f(t) = 2 \cdot 10^{-3} \exp \left[-2 \cdot 10^{-3} \cdot t \right]$, второе нормальное распределение с параметрами $m_t = 500 \ vac$, $\sigma_t = 180 \ vac$.
- 2. Система телеизмерений состоит из основного канала и трех резервных, находящихся в ненагруженном режиме. Переключающее устройство принимается абсолютно надежным. Система отказывает в момент, когда выходит из строя последний работоспособный канал. Каждый из каналов имеет экспоненциаль-

- ный закон распределения наработки отказа с интенсивностью отказов $\lambda = 10^{-2} \; uac^{-1}$. Определить среднюю наработку до отказа и среднее квадратическое отклонение наработки до отказа системы.
- 3. Система состоит из двух блоков, один из которых содержит шесть, а другой четыре равнонадежных элемента, имеющих экспоненциальное распределение наработки до отказа. Определить, какая должна быть вероятность безотказной работы каждого блока, чтобы требуемая вероятность безотказной работы системы в течение наработки $t_i = 100 \, vac$ была не менее $P(t_i) = 0.85$.

Вариант 12

- 1. Определить, какой должна быть средняя наработка до отказа элемента, имеющегося экспоненциальный закон распределения наработки до отказа, что-бы вероятность безотказной работы была не менее 0,99 в течение наработки $t_i = 300 \, vac$.
- 2. В системе применено нагруженное резервирование микропроцессорных контроллеров по схеме два из трех. Определить какой должна быть средняя наработка на отказ одного контроллера, чтобы обеспечить требуемую вероятность безотказной работы системы $P(t_i) = 0.99$ в течение наработки $t_i = 50$ час.
- 3. Восстанавливаемая система с экспоненциальным законом распределения времени безотказной работы и времени восстановления имеет коэффициент готовности $K_{\varepsilon}=0.95$. Вычислить вероятность безотказной работы системы в течение наработки $(0\div10)$ час, если среднее время восстановления $T_{\varepsilon}=5$ часов.

Вариант 13

- 1. Тиристорный выпрямительный блок имеет нормальное распределение наработки до отказа с параметрами $m_t = 800~vac$. и $\sigma_t = 100~vac$. Определить вероятность безотказной работы блока для значений наработки $t_1 = 600~vac$., $t_2 = 800~vac$., $t_3 = 1000~vac$.
- 2. Восстанавливаемая система с экспоненциальным законом распределения времени безотказной работы и времени восстановления имеет коэффициент готовности $K_c = 0.9$. Определить вероятность нахождения системы в работоспособном состоянии в момент времени $t_1 = 200 \, vac$., если наработка на отказ составляет $1000 \, vac$.
- 3. Вычислить значение параметра потока отказов системы с нагруженным резервом, если параметры потоков отказа основного и резервного элемента постоянны, одинаковы и равны $\omega(t) = 10^{-3} \, uac^{-1}$, а корреляция между последовательными отказами отсутствует.

Вариант 14

1. Наработка до отказа системы имеет распределение Вейбулла с параметром $\delta = 1.8$. Вероятность безотказной работы системы при $t = 100 \, vac$. равна 0,95.

Определить интенсивность отказов в момент времени $t = 100 \, vac$. и среднюю наработку до отказа системы.

- 2. Параметр потока отказов восстанавливаемой системы $\omega(t)=10^{-2}\,vac^{-1}$, среднее время восстановления $\overline{T}_{s}=50\,vac$. Вычислить вероятность того, что система будет в работоспособном состоянии в момент времени $t=20\,vac$.
- 3. В результате наблюдения за эксплуатацией 100 неремонтируемых элементов (микросхем) зафиксированы отказы 12-ти элементов. Значения наработки до отказа (в днях): 58, 110, 117, 198, 387, 570, 610, 720, 798, 820, 840, 921. После двенадцатого отказа наблюдения были прекращены. Определить среднюю наработку до отказа элементов, предполагая двухпараметрическое распределение Вейбулла наработки до отказа при параметре формы $\delta = 1$.

Вариант 15

1. В результате испытаний 100 микросхем, проводившихся в течение 2000 час, получены следующие данные о наработках до отказа

Интервалы наработки,	0-200	200-400	400-800	800-1200	1200-1600	1600-1800
час						
Число отказов	5	7	5	2	1	2

Вычислить значения интенсивности отказов микросхем и плотности распределения наработки до отказа и построить графики изменения во времени данных показателей.

- 2. САУ состоит из пяти основных элементов \Im_1 - \Im_5 с интенсивностями отказов $\lambda_1=0{,}008\,uac^{-1};\ \lambda_2=0{,}005\,uac^{-1};\ \lambda_3=0{,}02\,uac^{-1};\ \lambda_4=0{,}01\,uac^{-1};\ \lambda_5=0{,}03\,uac^{-1}.$ Имеется возможность приобретения ещё одного элемента, которым можно зарезервировать любой из основных. Необходимо определить какой из основных элементов необходимо зарезервировать, чтобы получить наибольшую среднюю наработку на отказ. Вычислить вероятность отказа системы в момент времени равный $1000\,uac$.
- 3. Сконструировать резервированную систему минимальной сложности со средней наработкой до отказа не менее 400 дней, используя часть (или все) элементы с интенсивностями отказов $\lambda_1=0{,}004$; $\lambda_2=0{,}005$; $\lambda_3=0{,}006$; $\lambda_4=0{,}007$; $\lambda_5=0{,}008$. Определить величину средней наработки до отказа системы.

3. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ "ДИАГНОСТИКА И НАДЕЖНОСТЬ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ"

3.1 Надежность: основные понятия и определения

При анализе и оценке надежности, конкретные технические устройства именуются обобщенным понятием "объект". Объект - это предмет определен-

ного целевого назначения, рассматриваемый в периоды проектирования, производства, эксплуатации, изучения, исследования и испытаний на надежность. Объектами могут быть системы и их элементы, в частности технические изделия, устройства, аппараты, приборы, их составные части, отдельные детали и т.д.

В соответствии с ГОСТ 27.002-89 "Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения" надежность трактуется, как свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, ремонта, хранения и транспортирования. Как видно из определения, надежность является комплексным свойством, которое в зависимости от назначения объекта и условий его пребывания может включать безотказность, долговечность, ремонтопригодность и сохраняемость или определенное сочетание этих свойств.

Безотказность - свойство объекта непрерывно сохранять работоспособное состояние в течение некоторого времени или наработки.

Долговечность - свойство объекта сохранять работоспособное состояние при установленной системе технического обслуживания и ремонта.

Ремонтопригодность - свойство объекта, заключающееся в приспособленности к поддержанию и восстановлению работоспособного состояния путем технического обслуживания и ремонта.

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

Указанные важнейшие свойства надежности характеризуют определенные технические состояния объекта. Различают пять основных видов технического состояния объектов.

Исправное состояние. Состояние объекта, при котором он соответствует всем требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации.

Неисправное состояние. Состояние объекта, при котором он не соответствует хотя бы одному из требований нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации.

Работоспособное состояние. Состояние объекта, при котором значения всех параметров, характеризующих способность выполнять заданные функции, соответствуют требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации.

Неработоспособное состояние. Состояние объекта, при котором значения хотя бы одного параметра, характеризующего способность выполнять заданные функции, не соответствует требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации.

Предельное состояние. Состояние объекта, при котором его дальнейшая эксплуатация недопустима или нецелесообразна, либо восстановление его работоспособного состояния невозможно или нецелесообразно.

Переход объекта (изделия) из одного вышестоящего технического состояния в нижестоящее обычно происходит вследствие событий: **повреждений** или **отказов**. Совокупность фактических состояний объекта и возникающих событий, способствующих переходу в новое состояние, охватывает так называемый жизненный цикл объекта, который протекает во времени и имеет определенные закономерности, изучаемые в теории надежности.

Согласно ГОСТ 27.002-89 **отказ** - это событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния объекта.

Повреждение - событие, заключающееся в нарушении исправного состояния объекта при сохранении работоспособного состояния.

Переход объекта из исправного состояния в неисправное не связан с отказом.

В ГОСТ 15467-79 введено еще одно понятие, отражающее состояние объекта - дефект. Дефектом называется каждое отдельное несоответствие объекта установленным нормам или требованиям. Дефект отражает состояние отличное от отказа. В соответствии с определением отказа, как события, заключающегося в нарушении работоспособности, предполагается, что до появления отказа объект был работоспособен. Отказ может быть следствием развития неустраненных повреждений или наличия дефектов: царапин; потертости изоляции; небольших деформаций.

В теории надежности, как правило, предполагается внезапный отказ, который характеризуется скачкообразным изменением значений одного или нескольких параметров объекта. На практике приходится анализировать и другие отказы, к примеру, ресурсный отказ, в результате которого объект приобретает предельное состояние, или эксплуатационный отказ, возникающий по причине, связанной с нарушением установленных правил или условий эксплуатации.

При расчетах и анализе надежности широко используются термины "элемент" и "система". Под элементом понимается часть сложного объекта, которая имеет самостоятельную характеристику надежности, используемую при расчетах и выполняющую определенную частную функцию в интересах сложного объекта, который по отношению к элементу представляет собой систему.

3.2 Показатели надежности

В соответствии с ГОСТ 27.002-89 для количественной оценки надежности применяются количественные показатели оценки отдельных ее свойств: безот-казности, долговечности, ремонтопригодности и сохраняемости, а также комплексные показатели, характеризующие готовность и эффективность использования технических объектов.

Эти показатели позволяют проводить расчетно-аналитическую оценку количественных характеристик отдельных свойств при выборе различных схемных и конструктивных вариантов оборудования (объектов) при их разработке, испытаниях и в условиях эксплуатации. Комплексные показатели надежности используются главным образом на этапах испытаний и эксплуатации

при оценке и анализе соответствия эксплуатационно-технических характеристик технических объектов (устройств) заданным требованиям.

На стадиях экспериментальной отработки, испытаний и эксплуатации, как правило, роль показателей надежности выполняют статистические оценки соответствующих вероятностных характеристик. В целях единообразия все показатели надежности, в соответствии с ГОСТ 27.002-89, определяются как вероятностные характеристики. В данном пособии отказ объекта рассматривается как случайное событие, то есть заданная структура объекта, и условия его эксплуатации не определяют точно момент и место возникновения отказа. Принятие этой, более распространенной, концепции предопределяет широкое использование теории вероятностей.

3.2.1 Основные показатели безотказности объектов

3.2.1.1 Вероятность безотказной работы

Вероятность безотказной работы - это вероятность того, что в пределах заданий наработки отказ объекта не возникает. На практике этот показатель определяется статистической оценкой

$$\hat{P}(t) = \frac{N_0 - n(t)}{N_0}$$
 (1)

где N_0 - число однотипных объектов (элементов), поставленных на испытания (находящихся под контролем); во время испытаний отказавший объект не восстанавливается и не заменяется исправным;

n(t) - число отказавших объектов за время t.

Из определения вероятности безотказной работы видно, что эта характеристика является функцией времени, причем она является убывающей функцией и может принимать значения от $1\ \mathrm{дo}\ 0$.

График вероятности безотказной работы объекта изображен на рисунке 1.

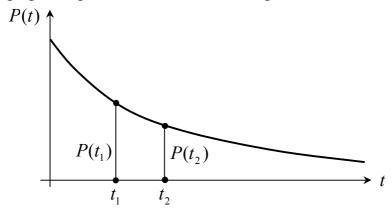


Рисунок $1 - \Gamma$ рафик функции P(t)

Как видно из графика, функция P(t) характеризует изменение надежности во времени и является достаточно наглядной оценкой. Например, на испы-

тания поставлено 1000 образцов однотипных элементов, то есть $N_0 = 1000$ микросхем.

При испытании отказавшие элементы не заменялись исправными. За время t отказало 10 микросхем. Следовательно, P(t)=0.99 и наша уверенность состоит в том, что любая микросхема из данной выборки не откажет за время t с вероятностью P(t)=0.99.

Иногда практически целесообразно пользоваться не вероятностью безотказной работы, а вероятностью отказа Q(t). Поскольку работоспособность и отказ являются состояниями несовместимыми и противоположными, то их вероятности связаны зависимостью:

$$P(t) + Q(t) = 1 \tag{2}$$

следовательно Q(t) = 1 - P(t).

Если задать время T, определяющее наработку объекта до отказа, то $P(t) = P(T \ge t)$, то есть вероятность безотказной работы - это вероятность того, что время T от момента включения объекта до его отказа будет больше или равно времени t, в течение которого определяется вероятность безотказной работы. Из вышесказанного следует, что $Q(t) = P(T \le t)$. Вероятность отказа есть функция распределения времени работы T до отказа Q(t) = F(t). Статистическая оценка вероятности отказа:

$$\hat{Q}(t) = 1 - \frac{N_0 - n(t)}{N_0}; \quad \hat{Q}(t) = \frac{n(t)}{N_0}$$
 (3)

Известно, что производная от вероятности отказа по времени есть плотность вероятности или дифференциальный закон распределения времени работы объекта до отказа

$$\frac{dQ(t)}{dt} = \frac{dF(t)}{dt} = Q'(t) = f(t) \tag{4}$$

Полученная математическая связь позволяет записать

$$P(t) = 1 - \int_{0}^{t} f(t)dt \tag{5}$$

Таким образом, зная плотность вероятности f(t), легко найти искомую величину P(t).

На практике достаточно часто приходится определять условную вероятность безотказной работы объекта в заданном интервале времени $P(t_1,t_2)$ при условии, что в момент времени t_1 объект работоспособен и известны $P(t_1)$ и $P(t_2)$. На основании формулы вероятности совместного появления двух зависимых событий, определяемой произведением вероятности одного из них на условную вероятность другого, вычисленную при условии, что первое событие уже наступило, запишем

$$P(t_2) = P(t_1) \cdot P(t_1, t_2)$$
, откуда $P(t_1, t_2) = \frac{P(t_2)}{P(t_1)}$

По известным статистическим данным можно записать $\hat{P}(t_1,t_2) = \frac{N(t_2)}{N(t_1)}$,

где $N(t_1)$, $N(t_2)$ - число объектов, работоспособных соответственно к моментам времени t_1 и t_2 : $N(t_1) = N_0 - n(t_1)$; $N(t_2) = N_0 - n(t_2)$.

Отметим, что не всегда в качестве наработки выступает время (в часах, годах). К примеру, для оценки вероятности безотказной работы коммутационных аппаратов с большим количеством переключений (вакуумный выключатель) в качестве переменной величины наработки целесообразно брать количество циклов "включить - выключить". При оценке надежности скользящих контактов удобнее в качестве наработки брать количество проходов токоприемника по этому контакту, а при оценке надежности движущихся объектов наработку целесообразно брать в километрах пробега. Суть математических выражений оценки P(t), Q(t), f(t) при этом остается неизменной.

3.2.1.2 Средняя наработка до отказа

Средней наработкой до отказа называется математическое ожидание наработки объекта до первого отказа T_1 .

Вероятностное определение средней наработки до отказа выражается так:

$$T_1 \int_0^\infty t \cdot f(t) dt \tag{6}$$

Суть математических выражений оценки f(t), Q(t) и P(t), запишем $T_1 = \int\limits_{\hat{}}^{\infty} t \cdot Q'(t) dt$, а зная, что Q'(t) = -P'(t), получим:

$$T_1 = -\int_0^\infty t \cdot P'(t)dt = -t \cdot P(t) \Big|_0^\infty + \int_0^\infty P(t)dt$$
 (7)

Полагая, что $\lim_{t\to\infty}t\cdot p(t)=0$ и учитывая, что $\stackrel{\circ}{P}(0)=1$, получаем:

$$T_1 = \int_0^\infty P(t)dt \tag{8}$$

Таким образом, средняя наработка до отказа равна площади, образованной кривой вероятности безотказной работы P(t) и осями координат. Статистическая оценка для средней наработки до отказа определяется по формуле

$$\hat{T}_1 = \frac{1}{N_0} \sum_{j=0}^{N_0} t_j \tag{9}$$

где N_0 - число работоспособных однотипных невосстанавливаемых объектов при t=0 (в начале испытания);

 t_j - наработка до отказа j -го объекта.

Отметим, что как и в случае с определением P(t) средняя наработка до отказа может оцениваться не только в часах (годах), но и в циклах, километрах пробега и другими аргументами.

3.2.1.3 Интенсивность отказов

Интенсивность отказов - это условная плотность вероятности возникновения отказа объекта, определяемая при условии, что до рассматриваемого момента времени отказ не наступил. Из вероятностного определения следует, что

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{1 - Q(t)} = -\frac{1}{P(t)} \cdot P'(t) \tag{10}$$

Статистическая оценка интенсивности отказов имеет вид:

$$\hat{\lambda}(t) = \frac{n(\Delta t_i)}{N_{\tilde{n}\tilde{\alpha}i} \Delta t_i} \tag{11}$$

где $n(\Delta t_i)$ - число отказов однотипных объектов на интервале Δt_i , для которого определяется $\hat{\lambda}(t)$;

 N_{cpi} - число работоспособных объектов в середине интервала Δt_i в соответствии с рис. 2.

$$N_{cpi} = \frac{N_i + N_{i+1}}{2} \tag{12}$$

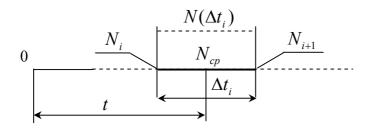


Рисунок 2 — Схема для определения N_{cp}

где N_i - число работоспособных объектов в начале интервала Δt_i ; N_{i+1} - число работоспособных объектов в конце интервала Δt_i .

Если интервал Δt_i уменьшается до нулевого значения $(\Delta t_i \to 0)$, то

$$N_{cpi} = N_0 - n(t) - \frac{n(\Delta t_i)}{2}$$
 (13)

где $N_0\,$ - количество объектов, поставленных на испытания;

 Δt_i - интервал, продолжающий время t;

 $n(\Delta t_i)$ - количество отказов на интервале Δt_i .

Умножив и поделив в формуле 13 правую часть на N_0 и перейдя к предельно малому значению Dt , вместо выражения 12, получим

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\frac{n(\Delta t_i)}{N_0 \cdot \Delta t}}{\left[N_0 - n(t) - \frac{n(\Delta t_i)}{2}\right]} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\frac{\Delta Q(t)}{\Delta t}}{N_0}$$

$$(14)$$

где
$$\lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta Q}{\Delta t} = Q'(t)$$
, а $\frac{N_0 - n(t)}{N_0} = P(t)$

Следовательно, $\lambda(t) = \frac{Q'(t)}{P(t)} = -\frac{1}{P(t)}P'(t)$, что и записано в вероятностном определении $\lambda(t)$ по формуле 10.

Решение формулы 10 дает:
$$\int_{0}^{t} \lambda(t)dt = -\ln P(t)$$
 или $P(t) = e^{-\int_{0}^{t} \lambda(t)dt}$ (15)

Выражение (15) показывает связь $\lambda(t)$ и P(t). Из этой связи ясно видно, что по аналитически заданной функции $\lambda(t)$ легко определить P(t) и T_1

$$T_1 = \int_0^\infty P(t)dt = \int_0^\infty e^{-\int_0^t \lambda(t)dt}$$
(16)

Если при статистической оценке $\lambda(t)$ время эксперимента разбить на достаточно большое количество одинаковых интервалов Δt за длительный срок, то результатом обработки опытных данных будет график, изображенный на рисунке 3.

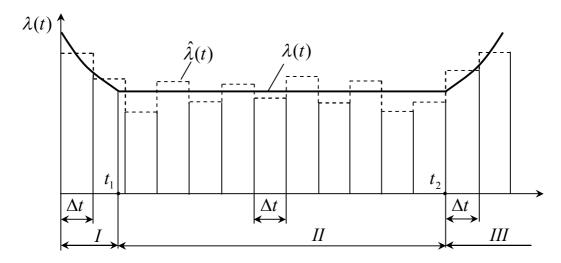


Рисунок 3 – Кривая жизни элемента

- - - опытные данные; — линеаризованная усредненная кривая; I – интервал приработки; II – интервал нормальной эксплуатации; III – интервал старения.

Как показывают многочисленные данные анализа надежности большинства объектов техники линеаризованная обобщенная зависимость $\lambda(t)$ представляет собой сложную кривую с тремя характерными интервалами (I, II, III). На интервале II $(t_2 - t_1)$ $\lambda = const$. Этот интервал может составлять более 10-ти лет, он связан с нормальной эксплуатацией объектов. Интервал I $(t_1 - 0)$ часто называют периодом приработки элементов. Он может увеличиваться или уменьшаться в зависимости от уровня организации отбраковки элементов на заводе-изготовителе, где элементы с внутренними дефектами своевременно изымаются из партии выпускаемой продукции. Величина интенсивности отказов на этом интервале во многом зависит от качества сборки схем сложных устройств, соблюдения требований монтажа и т.п. Включение под нагрузку собранных схем приводит к быстрому "выжиганию" дефектных элементов и по истечении некоторого времени t_1 в схеме остаются только исправные элементы, и их эксплуатация связана с $\lambda = const$. На интервале III $(t > t_2)$ по причинам, обусловленным естественными процессами старения, изнашивания, коррозии и т.д., интенсивность отказов резко возрастает, увеличивается число деградационных отказов. Для того, чтобы обеспечить $\lambda = const$ необходимо заменить неремонтируемые элементы на исправные новые или работоспособные, отработавшие время $t << t_2$. Интервал $\lambda = const$ соответствует экспоненциальной модели распределения вероятности безотказной работы. Эта модель подробно проанализирована в подразделе 3.2. Здесь же отметим, что при $\lambda = const$ значительно упрощается расчет надежности и λ наиболее часто используется как исходный показатель надежности элемента.

3.2.1.4 Средняя наработка на отказ

Этот показатель относится к восстанавливаемым объектам, при эксплуатации которых допускаются многократно повторяющиеся отказы. Эксплуатация таких объектов может быть описана следующим образом: в начальный момент времени объект начинает работу и продолжает работу до первого отказа; после отказа происходит восстановление работоспособности, и объект вновь работает до отказа и т.д. На оси времени моменты отказов образуют поток отказов, а моменты восстановлений - поток восстановлений.

Средняя наработка на отказ объекта (наработка на отказ) определяется как отношение суммарной наработки восстанавливаемого объекта к числу отказов, происшедших за суммарную наработку:

$$\hat{T} = \frac{\sum_{i=1}^{n} t_i}{n(t)} \tag{17}$$

где t_i - наработка между i-1 и i -м отказами, ч; n(t) - суммарное число отказов за время t .

3.2.1.5 Параметр потока отказов

Этот показатель также характеризует восстанавливаемый объект и по статистическим данным определяется с помощью формулы:

$$\hat{\omega}(t) = \frac{n(t_2) - n(t_1)}{t_2 - t_1} \tag{18}$$

где $n(t_1)$ и $n(t_2)$ - количество отказов объекта, зафиксированных соответственно, по истечении времени t_1 и t_2 .

Если используются данные об отказах по определенному количеству восстанавливаемых объектов, то

$$\hat{\omega}(t) = \frac{n(\Delta t_i)}{N_0 \cdot \Delta t_i} \tag{19}$$

где $n(\Delta t_i)$ - количество отказов по всем объектам за интервал времени Δt_i ; N_0 - количество однотипных объектов, участвующих в эксперименте (отказавший объект восстанавливается, $N_0=const$).

Нетрудно увидеть, что выражение (18) похоже на выражение (10) с той лишь разницей, что при определении $\hat{\omega}(t)$ предполагается моментальное восстановление отказавшего объекта или замена отказавшего однотипным работоспособным, то есть $N_0 = const$.

Параметр потока отказов представляет собой плотность вероятности возникновения отказа восстанавливаемого объекта. Отказы объектов возникают в случайные моменты времени и в течение заданного периода эксплуатации наблюдается поток отказов. Существует множество математических моделей потоков отказов. Наиболее часто при решении задач надежности используют простейший поток отказов - пуассоновский поток. Простейший поток отказов удовлетворяет одновременно трем условиям: стационарности, ординарности, отсутствия последствия.

Стационарность случайного процесса (времени возникновения отказов) означает, что на любом промежутке времени Δt_i вероятность возникновения n отказов зависит только от n и величины промежутка Δt_i , но не зависит от сдвига Δt_i по оси времени. Следовательно, при $\Delta t_i = \Delta t_{i+1} = ... = \Delta t_{i+m}$ вероятность появления n отказов по всем интервалам составит $q_n(\Delta t_i) = q_n(\Delta t_{i+1}) = ... = q_n(\Delta t_{i+m})$.

Ординарность случайного процесса означает, что отказы являются событиями случайными и независимыми. Ординарность потока означает невозможность появления в один и тот же момент времени более одного отказа, то есть $\lim q_{n>1_{N\to 0}}(\Delta t)=0$.

Отсутствие последствия означает, что вероятность наступления n отказов в течение промежутка Δt_i не зависит от того, сколько было отказов и как они распределялись до этого промежутка. Следовательно, факт отказа любого элемента в системе не приведет к изменению характеристик (работоспособно-

сти) других элементов системы, если даже система и отказала из-за какого-то элемента.

Опыт эксплуатации сложных технических систем показывает, что отказы элементов происходят мгновенно и если старение элементов отсутствует ($\lambda = const$), то поток отказов в системе можно считать простейшим.

Случайные события, образующие простейший поток, распределены по закону Пуассона [4,13, 15]:

$$P_n(t) = \frac{\left[\lambda \cdot y\right]^n}{n!} \cdot e^{-\lambda \cdot t} \tag{20}$$

где $P_n(t)$ - вероятность возникновения в течение времени t ровно n событий (отказов);

 λ - параметр распределения, совпадающий с параметром потока событий.

Если в выражении (20) принять n=0, то получим $P(t)=e^{-\lambda t}$ - вероятность безотказной работы объекта за время t при интенсивности отказов $\lambda=const$. Нетрудно доказать, что если восстанавливаемый объект при отсутствии восстановления имеет характеристику $\lambda=const$, то, придавая объекту восстанавливаемость, мы обязаны записать $\omega(t)=const$; $\lambda=\omega$. Это свойство широко используется в расчетах надежности ремонтируемых устройств. В частности, важнейшие показатели надежности оборудования даны в предположении простейших потоков отказов и восстановлений, когда $\lambda=\omega=\frac{1}{T}$ и соответст-

венно
$$T = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{\omega}$$
.

3.2.2 Основные показатели долговечности

3.2.2.1 Средний срок службы (математическое ожидание срока службы)

Для восстанавливаемого объекта, средний срок службы представляет собой среднюю календарную продолжительность эксплуатации объекта от ее начала или ее возобновления после ремонта определенного вида до перехода в предельное состояние.

3.2.2.2 Средний ресурс (математическое ожидание ресурса)

Средний ресурс представляет собой среднюю наработку объекта от начала эксплуатации или ее возобновления после предупредительного ремонта до наступления предельного состояния. В эксплуатации весьма важно так подобрать параметры объекта по мощности, стратегии технического обслуживания и ремонта, режимов работы, чтобы срок службы и срок срабатывания ресурса совпадали. Опыт эксплуатации объектов массового производства показывает, что как наработка на отказ, так и наработка между отказами имеют значительный статистический разброс. Аналогичный разброс имеют также ресурс и срок

службы. Этот разброс зависит от технологической культуры и дисциплины, а также достигнутого уровня технологии, как изготовления объектов, так и их эксплуатации (использования по назначению, технического обслуживания, ремонта). Разброс наработки до первого отказа, ресурса и срока службы можно уменьшить при увеличении их значения вышеназванными способами.

Поскольку средний и капитальный ремонты позволяют частично или полностью восстановить ресурс, то отсчет наработки при исчислении ресурса возобновляют по окончании такого ремонта, различая в связи с этим доремонтный, межремонтный, послеремонтный и полный (до списания) ресурс. Встречающийся достаточно часто термин "технический ресурс" представляет собой запас возможной наработки объекта. Полный ресурс отсчитывают от начала эксплуатации объекта до его перехода в предельное состояние, соответствующее окончательному прекращению эксплуатации.

Аналогичным образом выделяют и виды срока службы. Соотношение значений ресурса и срока службы зависит от интенсивности использования объекта. Полный срок службы, как правило, включает продолжительность всех видов ремонта, то есть учитывается календарный срок.

Для невосстанавливаемого объекта ресурс представляет собой среднюю продолжительность работы до отказа или до наступления предельного состояния. Практически эта величина совпадает со средней наработкой до отказа T_1 .

Одной из характеристик надежности элемента является его γ — процентный ресурс. Под ресурсом понимается наработки до какого-либо заранее заданного состояния надежности элемента. В частности, такое заданное состояние характеризуется вероятностью $P(t)=\gamma$, где $0\leq\gamma\leq1$. В этом случае γ — процентный ресурс элемента равен отрезку времени от нуля до t_{γ} , являющегося

корнем уравнения $P(t_{\gamma}) = \frac{\gamma\%}{100}$, где $\gamma\%$ задается в интервале [0,100%]. Это уравнение легко решается графически в соответствии с рисунком 4.

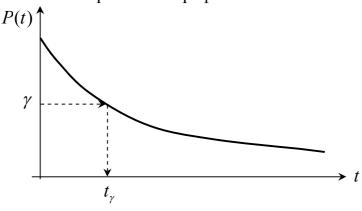


Рисунок 4 — Определение γ — процентного ресурса элемента

3.2.3 Основные показатели ремонтопригодности

При количественном описании этого свойства, которое присуще только

восстанавливаемому объекту, время восстановления является случайной величиной, зависящей от целого ряда факторов: характера возникшего отказа; приспособленности объекта (устройства, установки и др.) к быстрому обнаружению отказа; квалификации обслуживающего персонала; наличия технических средств; быстроты замены отказавшего элемента в объекте и др. Время восстановления - это время, затраченное на обнаружение, поиск причины отказа и устранения последствий отказа. Опыт показывает, что в сложных системах 70-90% времени восстановления приходится на поиск отказавшего элемента.

3.2.3.1 Среднее время восстановления

Среднее время восстановления - это математическое ожидание времени восстановления работоспособного состояния объекта после отказа. Из определения следует, что

$$\hat{T}_B = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \tau_i \tag{21}$$

где n - число восстановлений, равное числу отказов;

 au_i - время, затраченное на восстановление (обнаружение, поиск причины и устранение отказа), в часах.

Показатель \hat{T}_{B} можно определить и на основании статистических данных, полученных для М однотипных восстанавливаемых объектов. Структура расчетной формулы остается той же

$$\hat{T}_{B} = \frac{\sum_{j=1}^{M} \tau_{j}}{\sum_{j=1}^{M} n_{j}}$$
 (22)

где M - количество однотипных объектов, для каждого из которых определено общее время восстановления τ_j за заданное время наблюдений $\tau_j = \sum_{i=1}^{n_j} \tau_{ij}$,

где au_{ij} - время восстановления j -го объекта после i -го отказа; n_j - количество восстановлений j -го объекта за время наблюдений, причем $1 \le j \le M$.

3.2.3.2 Интенсивность восстановления

Интенсивность восстановления - это отношение условной плотности вероятности восстановления работоспособного состояния объекта, определенной для рассматриваемого момента времени при условии, что до этого момента восстановление не было завершено, к продолжительности этого интервала.

Статистическая оценка этого показателя находится как

$$\hat{\mu}(t) = \frac{n_B(\Delta t)}{N_{_{H,CP}} \cdot \Delta t} \tag{23}$$

где $n_B(\Delta t)$ - количество восстановлений однотипных объектов за интервал Δt ; $N_{\text{н.ср.}}$ - среднее количество объектов, находящихся в невосстановленном состоянии на интервале Δt .

В частном случае, когда интенсивность восстановления постоянна, то есть $\mu(t) = \mu = const$, вероятность восстановления за заданное время t подчиняется экспоненциальному закону и определяется по выражению

$$G_B(t) = 1 - e^{-\mu \cdot t}$$
 (24)

Этот частный случай имеет наибольшее практическое значение, поскольку реальный закон распределения времени восстановления большинства электроэнергетических объектов (поток восстановлений) близок к экспоненциальному. Используя свойства этого распределения, запишем очень важную зави-

симость
$$T_B = \frac{1}{\mu}$$
, а также

$$\mu = \frac{1}{T_R} \tag{25}$$

В дальнейшем эта взаимосвязь между T_B и μ будет часто использоваться при анализе восстанавливаемых систем.

При более детальных расчетах показателей надежности ремонтируемых (восстанавливаемых) объектов определяется такой показатель ремонтопригодности, как процентное время восстановления γ_B . Это время, в течение которого восстановление работоспособности объекта будет осуществлено с вероятностью γ_B , выраженной в процентах.

Функциональные $\beta(t)$ и численные α показатели надежности можно представить в векторной форме:

$$\beta(t) = \{ P(t), Q(t), f(t), \lambda(t), \mu(t), \hat{\omega}(t) \}$$

$$\alpha = \{ T_1, T_{\beta}, \hat{T}, t_{\gamma}, \sigma^2, \dots \}.$$
(26)

3.2.4 Комплексные показатели надежности

3.2.4.1 Коэффициент готовности и коэффициент простоя

Процесс функционирования восстанавливаемого объекта можно представить как последовательность чередующихся интервалов работоспособности и восстановления (простоя).

Коэффициент готовности - это вероятность того, что объект окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени, кроме планируемых периодов, в течение которых применение объекта по назначению не предусматривается. Математическое определение этого показателя дано ниже при анализе надежности восстанавливаемых систем.

Этот показатель одновременно оценивает свойства работоспособности и ремонтопригодности объекта.

Для одного ремонтируемого объекта коэффициент готовности

$$K_{\Gamma} = \frac{\sum_{i=1}^{n} t_{i}}{\sum_{i=1}^{n} t_{i} + \sum_{i=1}^{n} \tau_{i}}$$
(27)

$$K_{\Gamma} = \frac{\hat{T}}{\hat{T} + \hat{T}_{B}}, \quad K_{\Gamma \max} = 1$$
 (28)

Из формулы 28 видно, что коэффициент готовности объекта может быть повышен за счет увеличения наработки на отказ и уменьшения среднего времени восстановления. Для определения коэффициента готовности необходим достаточно длительный календарный срок функционирования объекта.

Зависимость коэффициента готовности от времени восстановления затрудняет оценку надежности объекта, так как по K_{Γ} нельзя судить о времени непрерывной работы до отказа. К примеру, для одного и того же численного значения K_{Γ} можно иметь малые интервалы τ_i и t_i (в соответствии с рисунком 5) и значительно большие. Таким образом, можно доказать, что на конкретном интервале работоспособности вероятность безотказной работы будет больше там, где больше t_i , хотя за этим интервалом может последовать длительный интервал простоя τ_i . Коэффициент готовности является удобной характеристикой для объектов, которые находятся в ждущем режиме, например, релейная защита, контактная сеть (особенно при относительно малых размерах движения), сложная контрольная аппаратура и т.д.

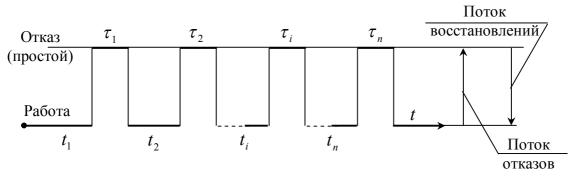


Рисунок 5 — График функционирования восстанавливаемого объекта: $t_1...t_n$ — интервалы работоспособности; $\tau_1...\tau_n$ — интервалы восстановления

Коэффициент простоя – это вероятность того, что объект окажется в неработоспособном состоянии в произвольный момент времени.

$$K_{II} = \frac{\hat{T}_B}{\hat{T} + \hat{T}_B}; \ 0 < K_{II} < 1; \ K_{\Gamma} + K_{II} = 1$$
 (29)

3.2.4.2 Коэффициент оперативной готовности

Коэффициент оперативной готовности $K_{\it OF}$ определяется как вероятность того, что объект окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени (кроме планируемых периодов, в течение которых применение объекта по назначению не предусматривается) и, начиная с этого момента, будет работать безотказно в течение заданного интервала времени.

Из вероятностного определения следует, что

$$K_{O\Gamma} = K_{\Gamma} \cdot P(t_{p}) \tag{30}$$

где K_{\varGamma} - коэффициент готовности;

 $P(t_p)$ - вероятность безотказной работы объекта в течение времени (t_p) , необходимого для безотказного использования по назначению.

Для часто используемого в расчетной практике простейшего потока отказов, когда $\lambda = \omega$, $P(t_p)$ соответственно определяется по выражению

$$P(t_p) = e^{-\lambda \cdot t_p} = e^{-\frac{1}{T} \cdot t_p}; K_{O\Gamma} = \frac{\hat{T}}{\hat{T} + \hat{T}_B} \cdot e^{-\frac{t}{\hat{T}}}$$
 (31)

Гамма ресурс готовности объекта t_{γ}^{Γ} равен отрезку времени, в течение которого $K_{O\Gamma}(t)$ не ниже заданного K_{γ} , $0 < K_{\Pi} < 1$.

$$K_{O\Gamma} = \frac{\hat{T}}{\hat{T} + \hat{T}_R} P(t_p) \tag{32}$$

3.2.4.3 Коэффициент технического использования

Коэффициент технического использования K_{TU} равен отношению математического ожидания суммарного времени пребывания объекта в работоспособном состоянии за некоторый период эксплуатации к математическому ожиданию суммарного времени пребывания объекта в работоспособном состоянии и простоев, обусловленных техническим обслуживанием и ремонтом за тот же период эксплуатации

$$K_{TU} = \frac{\sum_{i=1}^{n} t_i}{\sum_{i=1}^{n} t_i + \sum_{i=1}^{m} \tau_i + \sum_{j=1}^{k} \tau_j}$$
(33)

где t_i - время сохранения работоспособности в i -ом цикле функционирования объекта;

 au_i - время восстановления (ремонта) после i -го отказа объекта;

 au_j - длительность выполнения j-й профилактики, требующей вывода объекта из работающего состояния (использования по назначению);

n - число рабочих циклов за рассматриваемый период эксплуатации;

т - число отказов (восстановлений) за рассматриваемый период;

k - число профилактик, требующих отключения объекта в рассматриваемый период.

Как видно из формулы 32, коэффициент технического использования характеризует долю времени нахождения объекта в работоспособном состоянии относительно общей (календарной) продолжительности эксплуатации. Следовательно, K_{TU} отличается от K_{Γ} тем, что при его определении учитывается все время вынужденных простоев, тогда как при определении K_{Γ} время простоя, связанное с проведением профилактических работ, не учитывается.

Суммарное время вынужденного простоя объекта обычно включает время:

- на поиск и устранение отказа;
- регулировку и настройку объекта после устранения отказа;
- для простоя из-за отсутствия запасных элементов;
- для профилактических работ.

Для большинства технических средств и систем автоматизации предусмотрены плановые отключения для проведения плановых ремонтов и технического обслуживания. Эти интервалы времени, так же как и интервалы, связанные с отключением по причине отказа, учитываются при определении анализируемых коэффициентов надежности. В условиях эксплуатации на уровень надежности объектов большое влияние оказывают техническое обслуживание и ремонт.

ГОСТ 27.002-89 содержит, кроме проанализированных в данном пособии наиболее употребляемых показателей надежности, и другие показатели: среднюю трудоемкость восстановления, средний срок сохраняемости, гаммапроцентный ресурс, гамма-процентное время восстановления, гаммапроцентный срок сохраняемости и др. При необходимости определения указанных показателей используются специальные методики, где процедура расчета основывается на тех же законах математической статистики и теории вероятностей, по которым определяются и более широко используемые показатели надежности.

3.3 Основные математические модели, наиболее часто используемые в расчетах надежности

3.3.1 Распределение Вейбулла

Опыт эксплуатации очень многих электронных приборов и значительного количества электромеханической аппаратуры показывает, что для них характерны три вида зависимостей интенсивности отказов от времени, показанных на рисунке 6, соответствующих трем периодам жизни этих устройств.

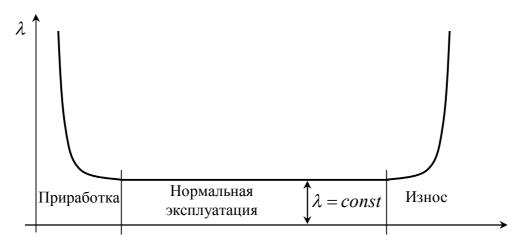


Рисунок 6 – Зависимость интенсивности отказов от времени

Нетрудно увидеть, что этот рисунок аналогичен рисунку 3, так как график функции $\lambda(t)$ соответствует закону Вейбулла. Указанные три вида зависимостей интенсивности отказов от времени можно получить, используя для вероятностного описания случайной наработки до отказа двухпараметрическое распределение Вейбулла. Согласно этому распределению плотность вероятности момента отказа

$$f(t) = \lambda \cdot \delta \cdot t^{\delta - 1} \cdot e^{-(\lambda \cdot t^{\delta})}$$
(34)

где δ - параметр формы (определяется подбором в результате обработки экспериментальных данных, $\delta > 0$);

 λ - параметр масштаба, $\lambda = \frac{1}{\hat{T}_1}$.

Интенсивность отказов определяется по выражению

$$\lambda(t) = \lambda \cdot \delta \cdot t^{\delta - 1} \tag{35}$$

Вероятность безотказной работы
$$P(t) = \int_{0}^{t} e^{-\lambda(t)} dt = e^{-\lambda \cdot t^{\delta}}$$
 (36) а средняя наработки до отказа $T_1 = \int_{0}^{\infty} P(t) dt = \int_{0}^{\infty} e^{-\lambda \cdot t^{\delta}} dt$ (37)

а средняя наработки до отказа
$$T_1 = \int_0^\infty P(t)dt = \int_0^\infty e^{-\lambda \cdot t^\delta} dt$$
 (37)

Отметим, что при параметре $\delta = 1$ распределение Вейбулла переходит в экспоненциальное, а при $\delta = 2$ - в распределение Рэлея.

При $\delta < 1$ интенсивность отказов монотонно убывает (период приработки), а при $\delta > 1$ монотонно возрастает (период износа) в соответствии с рисунком 6. Следовательно, путем подбора параметра δ можно получить на каждом из трех участков такую теоретическую кривую $\lambda(t)$, которая достаточно близко совпадает с экспериментальной кривой, и тогда расчет требуемых показателей надежности можно производить на основе известной закономерности.

Распределение Вейбулла достаточно близко подходит для ряда механических объектов (к примеру, шарикоподшипников), оно может быть использовано при ускоренных испытаниях объектов в форсированном режиме.

3.3.2 Экспоненциальное распределение

Как было отмечено в подразделе 3.1 экспоненциальное распределение вероятности безотказной работы является частным случаем распределения Вейбулла, когда параметр формы $\delta=1$. Это распределение однопараметрическое, то есть для записи расчетного выражения достаточно одного параметра $\lambda=const$. Для этого закона верно и обратное утверждение: если интенсивность отказов постоянна, то вероятность безотказной работы как функция времени подчиняется экспоненциальному закону

$$P(t) = e^{-\lambda \cdot t} \tag{38}$$

Среднее время безотказной работы при экспоненциальном законе распределения интервала безотказной работы выражается формулой

$$T_1 = \int_0^\infty e^{-\lambda \cdot t} dt = \frac{1}{\lambda}$$
 (39)

Заменив в выражении (38) величину λ величиной $\frac{1}{T_1}$, получим

$$P(t) = e^{-\frac{t}{T_1}} \tag{40}$$

Таким образом, зная среднее время безотказной работы T_1 (или постоянную интенсивность отказов λ), можно в случае экспоненциального распределения найти вероятность безотказной работы для интервала времени от момента включения объекта до любого заданного момента t.

Отметим, что вероятность безотказной работы на интервале, превышающем среднее время T_1 , при экспоненциальном распределении будет менее 0,368.

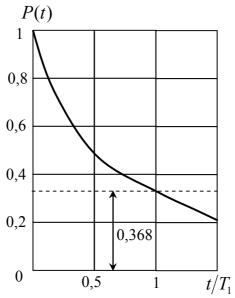


Рисунок 7 – График экспоненциального распределения

Длительность периода нормальной эксплуатации до наступления старения может оказаться существенно меньше T_1 , то есть интервал времени, на котором допустимо пользование экспоненциальной моделью, часто бывает меньшим среднего времени безотказной работы, вычисленного для этой модели. Это легко обосновать, воспользовавшись дисперсией времени безотказной работы. Как известно, если для случайной величины t задана плотность вероятности f(t) и определено среднее значение (математическое ожидание) T_1 , то дисперсия времени безотказной работы находится по выражению:

$$\sigma_{T_1}^2 = D[T_1] = \int_0^\infty (t - T_1)^2 \cdot f(t) dt \tag{41}$$

и для экспоненциального распределения соответственно равна

$$D[T_1] = -\int_{0}^{\infty} (t - T_1)^2 \cdot P'(t)dt = -\int_{0}^{\infty} (t - T_1)^2 \cdot \lambda \cdot e^{(-\lambda \cdot t)}dt$$
 (42)

После некоторых преобразований получим:

$$D[T_1] = \frac{1}{\lambda^2} = T_1^2 \tag{43}$$

Таким образом, наиболее вероятные значения наработки, группирующиеся в окрестности T_1 , лежат в диапазоне $T_1 \pm \sqrt{D[T_1]} = T_1 \pm T_1$, то есть в диапазоне от t=0 до $t=2T_1$. Как видим, объект может отработать и малый отрезок времени и время $t=2T_1$, сохранив $\lambda=const$. Но вероятность безотказной работы на интервале $2T_1$ крайне низка:

$$P(2T_1) = e^{-\lambda \cdot 2T_1} = e^{\left(-\frac{1}{T_1} \cdot 2T_1\right)} = e^{-2} = 0.135$$
(44)

Важно отметить, что если объект отработал предположим, время τ без отказа, сохранив $\lambda = const$, то дальнейшее распределение времени безотказной работы будет таким, как в момент первого включения $\lambda = const$.

Таким образом, отключение работоспособного объекта в конце интервала и новое его включение на такой же интервал множество раз приведет к пилообразной кривой $P(\tau) = e^{-\lambda \cdot \tau}$ в соответствии с рисунком 7.

Другие распределения не имеют указанного свойства. Из рассмотренного следует на первый взгляд парадоксальный вывод: поскольку за все время t устройство не стареет (не меняет своих свойств), то нецелесообразно проводить профилактику или замену устройств для предупреждения внезапных отказов, подчиняющихся экспоненциальному закону. Конечно, никакой парадоксальности этот вывод не содержит, так как предположение об экспоненциальном распределении интервала безотказной работы означает, что устройство не стареет. С другой стороны, очевидно, что чем больше время, на которое включается устройство, тем больше всевозможных случайных причин, которые могут вызвать отказ устройства. Это весьма важно для эксплуатации устройств, когда приходится выбирать интервалы, через которые следует производить профи-

лактические работы с тем, чтобы сохранить высокую надежность работы устройства.

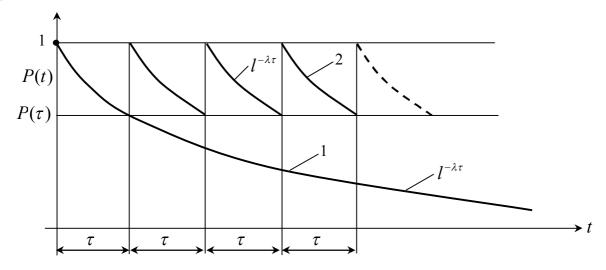


Рисунок 8 — Вероятность безотказной работы 1 — непрерывная работа за время t; 2 — работа с интервалами τ

Модель экспоненциального распределения часто используется для априорного анализа, так как позволяет не очень сложными расчетами получить простые соотношения для различных вариантов создаваемой системы. На стадии апостериорного анализа (опытных данных) должна проводиться проверка соответствия экспоненциальной модели результатам испытаний. В частности, если при обработке результатов испытаний окажется, что $T_1 = \sqrt{D[T_1]}$, то это является доказательством экспоненциальности анализируемой зависимости.

На практике часто бывает, что $\lambda \neq const$, однако и в этом случае его можно применять для ограниченных отрезков времени. Это допущение оправдывается тем, что при ограниченном периоде времени переменную интенсивность отказов без большой ошибки можно заменить средним значением: $\lambda(t) - \lambda_{cp}(t) = const$.

3.3.3 Распределение Рэлея

Плотность вероятности в законе Рэлея (рисунок 9) имеет следующий вид:

$$f(t) = \frac{t}{\delta_*^2} \cdot e^{\left(-\frac{t^2}{2\delta_*^2}\right)},\tag{45}$$

где δ_* - параметр распределения Рэлея (равен моде этого распределения). Его не нужно смешивать со среднеквадратическим отклонением ($\sigma_t = \sqrt{D[T_1]}$).

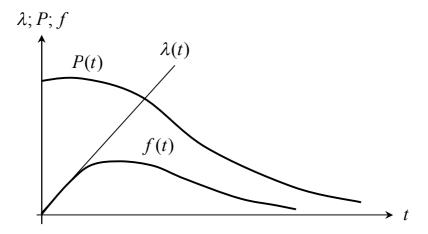


Рисунок 9 – Распределение Рэлея

Интенсивность отказов равна: $\lambda(t) = \frac{1}{\delta_*^2} \cdot t$.

Характерным признаком распределения Рэлея является прямая линия графика $\lambda(t)$, начинающаяся с начала координат.

Вероятность безотказной работы объекта в этом случае определится по выражению:

$$P(t) = e^{\begin{bmatrix} -\int_{0}^{t} \lambda(t)dt \end{bmatrix}} = e^{\left(\frac{-t^2}{2\delta_*^2}\right)}$$
(46)

Средняя наработка до отказа
$$T_1 = \int_0^\infty P(t)dt = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \cdot \delta_*$$
 (47)

3.3.4 Нормальное распределение (распределение Гаусса)

Нормальный закон распределения характеризуется плотностью вероятности вида

$$f(X) = \frac{1}{\sigma_X \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{\left[-\frac{(X - m_X)^2}{2\sigma_X^2}\right]}$$
(48)

где m_X , σ_X - соответственно математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение случайной величины X .

При $m_t \le 3\sigma$ рекомендуется применять усеченное нормальное распреде-

ление с плотностью вероятности вида
$$f(t) = \frac{C}{\sigma_t \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{\left[-\frac{(t-m_t)^2}{2\sigma_t^2}\right]}$$
.

Нормальный закон - это двухпараметрический закон, для записи которого нужно знать m_X и σ_X .

Вероятность безотказной работы определяется по формуле

$$P(t) = 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_t} \cdot \int_0^t e^{\left[-\frac{(t - m_t)^2}{2\sigma_t^2}\right]} dt$$
 (49)

а интенсивность отказов - по формуле $\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)}$.

На рисунке 10 изображены кривые $\lambda(t)$, P(t) и f(t) для случая $\sigma_t << m_t$, характерного для элементов, используемых в системах автоматического управления.

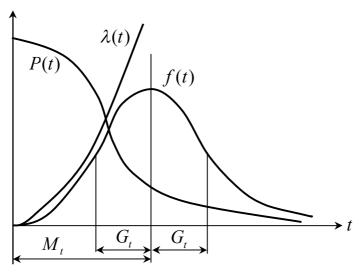


Рисунок 10 – Кривые нормального закона распределения

В данном пособии показаны только наиболее распространенные законы распределения случайной величины. Известен целый ряд законов, так же используемых в расчетах надежности: гамма-распределение, χ^2 - распределение, распределение Максвелла, Эрланга и др.

Следует отметить, что если неравенство $\sigma_t << m_t$ не соблюдается, то следует использовать усеченное нормальное распределение.

Для обоснованного выбора типа практического распределения наработки до отказа необходимо большое количество отказов с объяснением физических процессов, происходящих в объектах перед отказом.

В высоконадежных элементах электроустановок, во время эксплуатации или испытаний на надежность, отказывает лишь незначительная часть первоначально имеющихся объектов, поэтому значение числовых характеристик, найденное в результате обработки опытных данных, сильно зависит от типа предполагаемого распределения наработки до отказа. При различных законах наработки до отказа, значения средней наработки до отказа, вычисленные по одним и тем же исходным данным, могут отличаться в сотни раз, поэтому вопросу выбора теоретической модели распределения наработки до отказа необходимо уделять особое внимание с соответствующим доказательством приближения теоретического и экспериментального распределений.

3.3.5 Примеры использования законов распределения в расчетах надежности

Определим показатели надежности для наиболее часто используемых законов распределения времени возникновения отказов.

3.3.5.1 Определение показателей надежности при экспоненциальном законе распределения

Пример

Пусть объект имеет экспоненциальное распределение времени возникновения отказов с интенсивностью отказов $\lambda = 2.5 \cdot 10^{-5} \frac{1}{y_{AC}}$.

Требуется вычислить основные показатели надежности невосстанавливаемого объекта за $t = 2000 \, vac$.

Решение:

1. Вероятность безотказной работы за время $t = 2000 \, vac$ равна

$$P(2000) = e^{-2.5 \cdot 10^{-5} \cdot 2000} = e^{0.05} = 0.9512$$

- 2. Вероятность отказа за $t = 2000 \, чac$ равна q(2000) = 1 P(2000) = 1 0.9512 = 0.0488.
- 3. Используя выражение (2.5), вероятность безотказной работы в интервале времени от $500\, vac$ до $2500\, vac$ при условии, что объект проработал безотказно $500\, vac$ равна

$$P(500, 2500) = \frac{P(2500)}{P(500)} = \frac{e^{-2,5\cdot10^{-5}\cdot2500}}{e^{-2,5\cdot10^{-5}\cdot500}} = 0.9512.$$

4. Средняя наработка до отказа $T_1 = \frac{1}{2.5 \cdot 10^{-5}} = 40000 \, \text{час}$.

3.3.5.2 Определение показателей надежности при распределении Рэлея

Пример

Параметр распределения $\delta_*=100\, vac$. Требуется определить для $t=50\, vac$ величины P(t) , Q(t) , $\lambda(t)$, T_1 .

Решение:

Воспользовавшись формулами получим

$$P(50) = e^{\left(-\frac{t^2}{2\delta_*^2}\right)} = e^{-\left(\frac{50^2}{2\cdot100^2}\right)} = e^{-0.12} \approx 0.88;$$

$$Q(50) = 1 - P(50) = 1 - 0.88 \approx 0.12;$$

$$\lambda(50) = \frac{1}{\delta^2} \cdot t = \frac{50}{100^2} = 0.005 \frac{1}{uac};$$

$$T_1 = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \cdot \delta_* = \sqrt{\frac{3,14}{2}} \cdot 100 = 126 \text{ uac}.$$

3.3.5.3 Определение показателей схемы при распределении Гаусса

Пример

Электрическая схема собрана из трех последовательно включенных типовых резисторов: $R_1 = 3000~Om \pm 10\%$; $R_2 = 2000~Om \pm 10\%$; $R_3 = 1000~Om \pm 10\%$ (в % задано значение отклонения сопротивлений от номинального).

Требуется определить суммарное сопротивление схемы с учетом отклонений параметров резисторов.

Решение:

Известно, что при массовом производстве однотипных элементов плотность распределения их параметров подчиняется нормальному закону. Используя правило 3σ (трех сигм), определим по исходным данным диапазоны, в которых лежат значения сопротивлений резисторов: $3\sigma_{R_1} = \pm 300 \, OM$; $3\sigma_{R_2} = \pm 200 \, OM$; $3\sigma_{R_3} = \pm 100 \, OM$. Следовательно, $R_1 = 3000 \pm 300 \, OM$, $R_2 = 2000 \pm 200 \, OM$; $R_3 = 1000 \pm 100 \, OM$.

Когда значения параметров элементов имеют нормальное распределение, и элементы при создании схемы выбираются случайным образом, результирующее значение R_Σ является функциональной переменной, распределенной так же по нормальному закону, причем дисперсия результирующего значения, в нашем случае $\sigma_{R_\Sigma}^2$, определяется по выражению $\sigma_{R_\Sigma}^2 = \sigma_{R_1}^2 + \sigma_{R_2}^2 + \sigma_{R_3}^2$.

Поскольку результирующее значение R_{Σ} распределено по нормальному закону, то, воспользовавшись правилом 3σ , запишем $R_{\Sigma} = \left(\overline{R}_1 + \overline{R}_2 + \overline{R}_3\right) \pm 3\sigma_{R_{\Sigma}}$,

где \overline{R}_1 , \overline{R}_2 , \overline{R}_3 - номинальные паспортные параметры резисторов.

$$3\sigma_{R_{\Sigma}} = \sqrt{\left(3\sigma_{R_{1}}\right)^{2} + \left(3\sigma_{R_{2}}\right)^{2} + \left(3\sigma_{R_{3}}\right)^{2}} = \sqrt{300^{2} + 200^{2} + 100^{2}} = 374 \, OM$$

Таким образом $R_{\scriptscriptstyle\Sigma}=\left(3000+2000+1000\right)\pm374=6000\pm374~Om$, или $R_{\scriptscriptstyle\Sigma}=6000~Om\pm6,2\%$.

Данный пример показывает, что при увеличении количества последовательно соединенных элементов результирующая погрешность уменьшается. В частности, если суммарная погрешность всех отдельных элементов равна $\pm 600\,Om$, то суммарная результирующая погрешность равна $\pm 374\,Om$. В более сложных схемах, например в колебательных контурах, состоящих из индуктивностей и емкостей, отклонение индуктивности или емкости от заданных параметров сопряжено с изменением резонансной частоты, и возможный диапазон ее изменения можно предусмотреть методом, аналогичным с расчетом резисторов.

3.3.5.4 Пример определения показателей надежности неремонтируемого объекта по опытным данным

Пример

На испытании находилось $N_{\scriptscriptstyle 0}=1000\,$ образцов однотипной невосстанавливаемой аппаратуры, отказы фиксировались через каждые $100\,$ час.

Требуется определить $\hat{P}(t)$, $\hat{\lambda}(t)$, \hat{T}_1 в интервале времени от 0 до 1500 час. Число отказов $n(\Delta t_i)$ на соответствующем интервале Δt_i представлено в таблице 1.

Таблица 1 – Исходные данные и результаты расчетов

Номер і-го	Δt_i , час	$N(\Delta t_{_i})$,шт.	$\hat{P}(t)$	$\hat{\lambda}(t), 1/\div$
интервала	·	·		
1	0-100	50	0,950	$0.514 \cdot 10^{-3}$
2	100-200	40	0,910	0,430
3	200-300	32	0,878	0,385
4	300-400	25	0,853	0,284
5	400-500	20	0,833	0,238
6	500-600	17	0,816	0,206
7	600-700	16	0,800	0,198
8	700-800	16	0,784	0,202
9	800-900	15	0,769	0,193
10	900-1000	14	0,755	0,184
11	1000-1100	15	0,740	0,200
12	1100-1200	14	0,726	0,191
13	1200-1300	14	0,712	0,195
14	1300-1400	13	0,699	0,184
15	1400-1500	14	0,685	$0,202\cdot01^{-3}$

Решение:

Согласно формуле 1 для любого отрезка времени, отсчитываемого от

$$t = 0$$
, $\hat{P}(t) = \frac{N_0 - n(t_i)}{N_0}$, по формуле Гаусса $f(X) = \frac{1}{\sigma_X \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{\left[-\frac{(X - m_X)^2}{2\sigma_X^2}\right]}$

где t_i - время от начала испытаний до момента, когда зафиксировано $n(t_i)$ от-казов.

Подставляя исходные данные из таблицы 1, получим:

$$\hat{P}(100) \frac{1000 - 50}{1000} = 0.95;$$

$$\hat{P}(200) \frac{1000 - (50 + 40)}{1000} = 0.91;$$

$$\hat{P}(300) \frac{1000 - (50 + 40 + 32)}{1000} = 0.878;$$

.

$$\hat{P}(1500) = \frac{15}{1000} n(\Delta t_i)$$

$$\hat{P}(1500) = 0,685.$$

Воспользовавшись формулой 10, получим значение $\hat{\lambda}(t)$, 1/u ac:

$$\hat{\lambda}(50) = \frac{50}{(1000 - \frac{50}{2}) \cdot 100} = 0,513 \cdot 10^{-3};$$

$$\hat{\lambda}(150) = \frac{40}{\frac{(1000 - 50) + (1000 - 50 - 40)}{2} \cdot 100} = 0,43 \cdot 10^{-3};$$

$$\hat{\lambda}(250) = \frac{32}{\frac{(1000 - 50 - 40) + (1000 - 50 - 40 - 32)}{2} \cdot 100} = 0,358 \cdot 10^{-3};$$

.

$$\hat{\lambda}(1450) = \frac{14}{(1000 - \sum_{i=1}^{14} n(\Delta t_i) + (1000 - \sum_{i=1}^{15} n(\Delta t)_i)} = 0,202 \cdot 10^{-3}.$$

Средняя наработка до отказа, при условии отказов всех N_0 объектов, оп-

ределяется по выражению: $T_1 = \frac{\sum\limits_{j=1}^{N_0} t_j}{N_0}$,

где t_j - время отказа j -го объекта (j принимает значения от 0 до $N_{\scriptscriptstyle 0}$).

ствии с поставленной задачей воспользуемся формулой:

В данном эксперименте из $N_0 = 1000$ объектам отказало всего $\sum_{i=1}^{15} n(\Delta t_i) = 315$ объектов, поэтому по полученным опытным данным можно найти только приближенное значение средней наработки до отказа. В соответ-

$$\hat{T}_1 = \frac{1}{r} \left[\sum_{j=1}^r t_j + (N_0 - r) \cdot t_r \right] \quad \text{при} \quad r \le N_0,$$
 (50)

где t_j наработка до отказа j-го объекта (j принимает значения от 1 до r); r - количество зафиксированных отказов (в нашем случае r=315); t_r - наработка до r-го (последнего) отказа.

Полагаем, что последний отказ зафиксирован в момент окончания эксперимента ($t_r = 1500$).

На основе экспериментальных данных суммарная наработка объектов до отказа равна: $\sum_{j=1}^{315} t_j = \sum_{i=1}^{15} n(\Delta t_i) \cdot \bar{t}_i,$

где \bar{t}_i - среднее время наработки до отказа объектов, отказавших на интервале Δt_i .

$$\begin{split} \sum_{i=1}^{15} n(\Delta t_i) \cdot \bar{t_i} &= (50 \cdot 50 + 40 \cdot 150 + 32 \cdot 250 + 25 \cdot 350 + 20 \cdot 450 + 17 \cdot 550 + 16 \cdot 650 \\ &+ 15 \cdot 850 + 14 \cdot 950 + 15 \cdot 1050 + 14 \cdot 1150 + 14 \cdot 1250 + 13 \cdot 1350 + 14 \cdot 1450) = 179250. \\ \text{B результате } \hat{T_1} &= \frac{1}{315} \big[179250 + (1000 - 315) \cdot 1500 \big] = 3831 \, \text{vac} \end{split}$$

Примечание: обоснование расчетов \hat{T}_1 , по ограниченному объему опытных данных, изложено далее.

По полученным данным (см. табл. 3.1) построим график $\lambda(t)$.

Из графика видно, что после периода приработки $t \ge 600\, vac$ интенсивность отказов приобретает постоянную величину. Если предположить, что и в дальнейшем λ будет постоянной, то период нормальной эксплуатации связан с экспоненциальной моделью наработки до отказа испытанного типа объектов.

Тогда средняя наработка до отказа $T_1 = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{0,192 \cdot 10^{-3}} = 5208 \, \text{час}$

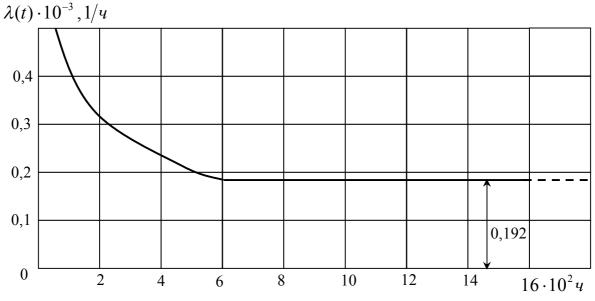


Рисунок 11 – Зависимость интенсивности отказов от времени

Таким образом, из двух оценок средней наработки до отказа $T_1 = 3831\, vac$ и $T_1 = 5208\, vac$ надо выбрать ту, которая более соответствует фактическому распределению отказов. В данном случае можно предполагать, что если бы провести испытания до отказа всех объектов, то есть $r = N_0$, достроить график (рис. 10) и выявить время, когда λ начнет увеличиваться, то для интервала

нормальной эксплуатации ($\lambda = const$) следует брать среднюю наработку до от-каза $T_1 = 5208 \ uac$.

В заключение по данному примеру отметим, что определение средней наработки до отказа по формуле (16), когда $r << N_0$, дает грубую ошибку. В на-

шем примере
$$\hat{T}_1 = \sum_{i=1}^{15} \frac{n(\Delta t_i) \cdot \bar{t}_i}{N_0} = \frac{179250}{1000} = 179,3 \, час$$

Если вместо N_0 поставим количество отказавших объектов r=315, то получим $\hat{T}_1=\frac{179250}{315}=569\,vac$

В последнем случае не отказавшие за время испытания объекты в количестве $N_0 - r = 1000 - 315 = 685 \, mm$. вообще в оценку не попали, то есть была определена средняя наработка до отказа только 315 объектов. Эти ошибки достаточно распространены в практических расчетах.

3.4 Надежность невосстанавливаемой системы при основном соединении элементов

3.4.1 Определение вероятности безотказной работы и средней наработки до отказа

Большинство систем спроектировано таким образом, что при отказе любого из элементов система отказывает. При анализе надежности такой системы предполагаем, что отказ любого из элементов носит случайный и независимый характер и не вызывает изменения характеристик (не нарушает работоспособности) остальных элементов. С точки зрения теории надежности в системе, где отказ любого из элементов приводит к отказу системы, элементы включены по основной схеме или последовательно. В понятии отказа заложен физический аналог электрической схемы с последовательным включением элементов, когда отказ любого из элементов связан с разрывом цепи. Но очень часто при расчетах надежности приходится физическое параллельное включение элементов рассматривать как последовательное включение расчетных элементов. Например, некоторый потребитель потребляет электроэнергию по двум одинаковым кабелям, причем сечение жил одного кабеля не в состоянии пропустить всю электрическую нагрузку потребителя. При выходе из строя одного кабеля, оставшийся в работе попадает под недопустимую перегрузку, и этот кабель с помощью защиты отключается, система электроснабжения отказывает, то есть отказ одного из кабелей вызывает отказ электроснабжения. Следовательно, при расчете надежности кабели, как расчетные элементы, имеют последовательную основную схему включения.

Предположим, что система состоит из n последовательно включенных элементов. Из теории вероятностей известно, что если определены вероятности появления нескольких независимых случайных событий, то совпадение этих событий определяется как произведение вероятностей их появлений. В нашем

случае работоспособное состояние любого из n элементов системы оценивается как вероятность безотказной работы элемента. Система будет находиться в работоспособном состоянии только при условии совпадения работоспособных состояний всех элементов. Таким образом, работоспособность системы оценивается как произведение вероятностей безотказной работы элементов:

$$P(t) = \prod_{i=1}^{n} P_i(t)$$
 (51)

где $P_i(t)$ - вероятность безотказной работы i -го элемента.

Система, как и элемент, может находиться в одном из двух несовместимых состояний: отказа или работоспособности. Следовательно, P(t) + Q(t) = 1, Q(t) = 1 - P(t)

где Q(t) - вероятность отказа системы, определяемая по выражению:

$$Q(t) = 1 - \prod_{i=1}^{n} P_i(t)$$
 (52)

При произвольном законе распределения времени наработки до отказа для каждого из элементов

$$P_i(t) = e^{-0} \lambda_i(t) dt$$
 Где $\lambda_i(t)$ - интенсивность отказов i -го элемента. (53)

Вероятность безотказной работы системы соответственно:

$$P(t) = \prod_{i=1}^{n} e^{-\int_{0}^{t} \lambda_{i}(t)dt}$$

$$(54)$$

По выражению (54) можно определить вероятность безотказной работы системы до первого отказа при любом законе изменения интенсивности отказов каждого из *п* элементов во времени.

Для наиболее часто применяемого условия $\lambda = const$ формула 54 примет вид:

$$P(t) = e^{-(\sum_{i=1}^{n} \lambda_i)t}$$
(55)

где $\sum_{i=1}^n \lambda_i$ можно представить как интенсивность отказов системы, сведенной к

эквивалентному элементу с интенсивностью отказов: $\lambda_0 = \sum_{i=1}^n \lambda_i = const$.

Таким образом, систему из n последовательно включенных элементов легко заменить эквивалентным элементом, который имеет экспоненциальный закон распределения вероятности безотказной работы. А это значит, если $\lambda_0 = const$, то средняя наработка до отказа системы $T_0 = \frac{1}{\lambda_0}$. Верно также и то,

что при условии: $\lambda_0 = const$, искомая величина определится как $\lambda_0 = \frac{1}{T_{0}}$.

В случае $\lambda = const$ средняя наработка до отказа системы определяется по выражению:

$$T_0 = \int_0^\infty P(t)dt \tag{56}$$

где P(t) находится по формуле 55.

3.5 Порядок решения задач надежности

3.5.1 Исходные положения

Надежность технического объекта любой сложности должна обеспечиваться на всех этапах его жизненного цикла: от начальной стадии выполнения проектно-конструкторской разработки до заключительной стадии эксплуатации. Основные условия обеспечения надежности состоят в строгом выполнении правила, называемого триадой надежности: надежность закладывается при проектировании, обеспечивается при изготовлении и поддерживается в эксплуатации. Без строгого выполнения этого правила нельзя решить задачу создания высоконадежных изделий и систем путем компенсации недоработок предыдущего этапа на последующем.

Если в процессе проектирования должным образом не решены все вопросы создания устройства или системы с заданным уровнем надежности и не заложены конструктивные и схемные решения, обеспечивающие безотказное функционирование всех элементов системы, то эти недостатки порой невозможно устранить в процессе производства и их последствия приведут к низкой надежности системы в эксплуатации. В процессе создания системы должны быть в полном объеме реализованы все решения, разработки и указания конструктора (проектировщика).

Важное значение в поддержании, а точнее в реализации необходимого уровня надежности имеет эксплуатация. При эксплуатации должны выполняться установленные инструкциями условия и правила применения устройств, к примеру, электроустановок; своевременно приниматься меры по изучению и устранению причин выявленных дефектов и неисправностей; анализироваться и обобщаться опыт использования устройств.

Обычно на типовые устройства массового производства заводизготовитель задает основные показатели надежности: среднюю наработку до отказа; интенсивность отказов; среднее время восстановления; технический ресурс и др.

3.5.2 Методы расчета надежности

Каждому этапу разработки или модернизации системы соответствует оп-

ределенный уровень расчета надежности. Как правило, выделяют три уровня расчетов: прикидочный; ориентировочный; окончательный. В таблице 2 показана примерная связь этапов разработки и уровней расчетов надежности систем автоматики и полупроводниковой техники.

На стадии прикидочного и ориентировочного расчетов предполагается, что объект (система) собран по основной схеме, интенсивность отказов всех элементов не зависит от времени, $\lambda_i = const$. Отказы элементов происходят случайно, любой отказ не вызывает изменения характеристик (работоспособности) элементов, кроме отказавшего, то есть поток отказов принимается простейшим.

В реальных условиях эксплуатации элементы, из которых собрана система, зачастую оказываются в условиях, значительно отличающихся от расчетных (номинальных). Это обстоятельство влияет как на надежность элементов, так и на систему в целом.

Таблица 2 – Этапы разработки и уровни расчетов надежности

T WOUTHING 2 STWINDS	разработки и уровии рас тетов падежности		
Этапы разработки	Уровень расчета		
системы			
Предэскизный проект	Прикидочный расчет с целью определения норм на-		
Разработка техниче-	дежности		
ского задания			
Эскизный проект	Ориентировочный расчет норм надежности		
Технический проект	Окончательный расчет с учетом режимов работы		
	элементов и факторов, воздействующих на систему		
Рабочий проект	Окончательный вариант расчета с учетом дополни-		
	тельных факторов, зависящих от принятых схемных		
	и конструктивных решений		
Готовый объект (стен-	Экспериментальная оценка уровня надежности объ-		
довые и натурные ис-	екта.		
пытания)	Выявление узлов с недостаточной надежностью.		
	Введение необходимых коррективов в схему и кон-		
	струкцию.		
	Внесение поправок в окончательный расчет.		

В специальной литературе по надежности даны таблицы и номограммы для определения поправочных коэффициентов при соответствующих величинах воздействующих факторов.

Проанализируем основные причины возникновения отказов в наиболее распространенных элементах автоматики и систем электроснабжения.

Резисторы - наиболее часто используемые элементы. Их надежность достаточно велика. У этих элементов наиболее частым видом отказа является обрыв. Статистические данные показывают, что свыше 55% отказов резисторов происходит из-за обрывов и 35-40% - из-за перегорания проводящего элемента, то есть 90-95% отказов связано с обрывом цепи резистора.

Конденсаторы, как и резисторы, широко распространены в схемах автоматики. Наиболее частый вид отказов конденсатора - пробой диэлектрика и пе-

рекрытие изоляции между обкладками (поверхностный разряд). Отказ конденсатора типа "короткое замыкание" составляет около 50% всех отказов.

В высоковольтных измерительных и силовых трансформаторах отказы наиболее часто обусловлены пробоем межобмоточной и слоевой изоляции. Снижение электрической прочности изоляции связано с низкой влагозащищенностью обмоточных материалов, ускорением старения диэлектрика, находящегося под воздействием случайно изменяющейся температуры и влажности. Для трансформаторов и дросселей эта зависимость может быть выражена с помощью температурных коэффициентов интенсивности отказов, значения которых зависят от типа трансформатора.

У полупроводниковых приборов - диодов, транзисторов, тиристоров, микросхем постепенные и внезапные отказы возникают чаще, чем другие виды отказов. Наиболее характерным изменением параметров полупроводниковых приборов, приводящим к постепенным отказам, является увеличение обратного тока диодов и неуправляемых обратных токов коллекторных переходов транзисторов и тиристоров. Внезапные отказы являются следствием ошибок в конструкции полупроводниковых приборов и нарушения технологии их изготовления. На основе данных о работе полупроводниковых приборов в различных схемах можно считать, что около 80% их отказов являются постепенными. В справочной литературе достаточно широко учтены влияющие факторы на работоспособность полупроводниковых приборов в виде поправочных коэффициентов, определяемых по таблицам или номограммам.

Расчет надежности рекомендуется проводить в следующем порядке.

- 1. Формируется понятие отказа. Прежде чем приступить к расчету надежности, необходимо четко сформулировать, что следует понимать под отказом объекта (системы) и выделить для расчета только те элементы, которые ведут к отказу объекта. В частности, по всем элементам следует задать вопрос, что произойдет с системой, если откажет определенный элемент? Если с отказом такого элемента система отказывает, то в системе анализируемый элемент включается последовательно (относительно схемы расчета надежности).
- 2. Составляется схема расчета надежности. Схему расчета надежности целесообразно составлять таким образом, чтобы элементами расчета были конструктивно оформленные блоки (звенья), которые имеют свои показатели надежности, техническую документацию, нормативы содержания и другие документы. Если в расчетах эти элементы работают не одновременно, то целесообразно такие элементы распределять по времени их работы на группы и образовать из этих групп самостоятельные блоки расчета. На схеме расчета надежности желательно указывать время работы каждого расчетного элемента.
- 3. Выбирается метод расчета надежности. В соответствии с видом расчета надежности выбираются расчетные формулы, и для определения интенсивности отказов системы по соответствующим таблицам и номограммам определяются величины интенсивности отказов элементов. При наличии ведомостей режимов работы элементов вычисляются поправочные коэффициенты для уточнения интенсивности отказов всех элементов. Если в течение времени работы системы элементы имеют не постоянную интенсивность отказов, но существуют четко

выраженные временные интервалы, где интенсивность отказов элементов постоянна, то для расчета используется так называемая эквивалентная интенсивность отказов элемента. Допустим, что интенсивность отказов элемента за период времени t_1 равна λ_1 , за последующий период t_2 равна λ_2 и т.д. Тогда интенсивность отказов элемента за период времени $t = t_1 + t_2 + t_3 + \ldots + t_k$ будет

$$\lambda_{_{_{\mathcal{H}KG}}} = \frac{1}{t} (\lambda_{_1} \cdot t_{_1} + \lambda_{_2} \cdot t_{_2} + \lambda_{_3} \cdot t_{_3} + \ldots + \lambda_{_k} \cdot t_{_k}).$$

- 4. Составляется таблица расчета интенсивности отказов системы с учетом всех расчетных элементов схемы.
- 5. Составляется таблица с учетом всех элементов схемы и режимов их работы для окончательного расчета надежности с использованием поправочных коэффициентов.
- 6. Рассчитываются количественные характеристики надежности.

Данные расчеты заносят в типовые таблицы, в которых на основе найденной интенсивности отказов определяются и заносятся другие показатели надежности.

Расчеты предлагаются в виде технического отчета, который должен содержать:

- 1) структурную схему надежности с кратким пояснительным текстом;
- 2) формулировку понятия отказа системы;
- 3) расчетные формулы для определения количественных показателей надежности;
- 4) расчет показателей надежности, сведенный в таблицы и графики;
- 5) оценку точности расчета с обоснованием принятых математических моделей;
- 6) выводы и рекомендации.

3.6 Надежность невосстанавливаемых резервированных систем

В эксплуатации систем широко распространен способ повышения их надежности за счет введения в схему системы дополнительных элементов, которые могут работать параллельно с основными элементами или подключаться на место отказавшего элемента. Таким образом, резервированной системой называется такая система, в которой отказ наступает только после отказа любого основного элемента и всех резервных у анализируемого элемента. Наиболее распространенные способы резервирования показаны на рисунке 12.

При общем резервировании основной объект (система) резервируется в целом, а при раздельном - резервируются отдельные части (элементы) системы. Под кратностью резервирования "m" понимается отношение числа резервных объектов к числу основных. При резервировании с целой кратностью величина m есть целое число (например, если m=2, то на один основной объект приходится два резервных). При резервировании дробной кратностью получается дробное несокращаемое число. Например, при m=4/2, резервных объектов 4, основных 2, общее число объектов 6. Сокращать дробь нельзя, так как новое отношение будет отражать совсем другой физический смысл.

По способу включения резервирование разделяется на постоянное и резервирование замещением. При постоянном резервировании резервные объекты подключены к нагрузке постоянно в течение всего времени работы и находятся в одинаковых с основными объектами условиях. При резервировании замещением замещают объекты основные (подключаются к нагрузке) после их отказа.

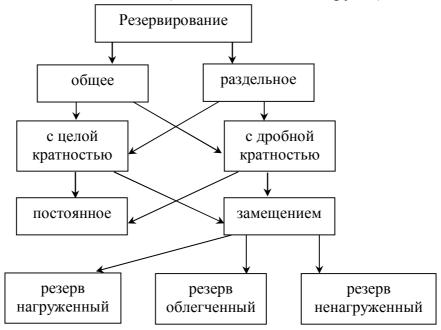


Рисунок 12 – Способы резервирования

3.6.1 Общее резервирование с постоянно включенным резервом и с целой кратностью

Резервированная схема изображена на рисунке 13.

Данная схема напоминает основную "0" электрическую цепь с "n" последовательно включенными элементами. Параллельно ей включено "m" резервных цепей, имеющих точно такие же параметры элементов, как и в основной цепи.

Анализ выполним при следующих допущениях:

- 1) отказы элементов являются случайными и независимыми событиями;
- 2) переключающие устройства идеальны (их надежность P(t) = 1, а основная и резервные цепи равнонадежны);
- 3) ремонт резервированной системы исключен.

Исходя из принятых допущений, используя формулу 51 для основной и резервных цепей определим вероятность безотказной работы

$$P_0(t) = \prod_{i=1}^n P_{0i}(t) = \prod_{i=1}^n P_{ji}(t) = \dots = \prod_{i=1}^n P_{mi}(t)$$
 (57)

где $P_{0i}(t)$ - вероятность безотказной работы i -го элемента основной "0" цепи; $P_{ji}(t)$ - вероятность безотказной работы i -го элемента j -й цепи.

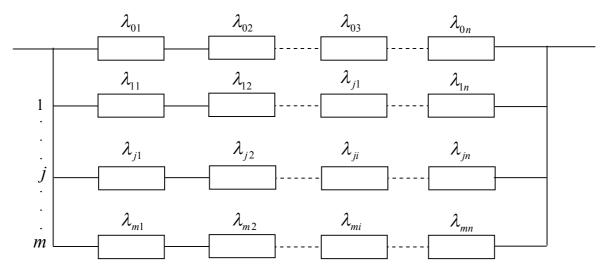


Рисунок 13 — Схема с общим нагруженным резервированием (количество резервных цепей $0 \le j \le m$)

Поскольку все одноименные элементы в каждой цепи имеют одинаковые параметры и находятся в одинаковых условиях, то их надежность в одно и то же время t одинакова. Следовательно, для всех цепей

$$P_0(t) = P_1(t) = \dots = P_i(t) = \dots P_m(t)$$
 (58)

Вероятность отказов анализируемых цепей соответственно запишется

$$Q_0(t) = 1 - P_0(t) = \dots = 1 - P_i(t) = \dots = 1 - P_m(t)$$
 (59)

Уточним понятие отказа системы. Она откажет, если откажет основная цепь и все резервные. Математически это состояние соответственно запишется так:

$$Q(t) = \prod_{j=0}^{m} Q_j(t)$$
(60)

где $Q_{j}(t)$ - вероятность отказа j -й цепи.

Поскольку все цепи идентичны и находятся в одинаковых условиях, то $Q_0(t) = Q_1(t) = \ldots = Q_j(t) = \ldots = Q_m(t)$, и тогда вероятность отказа системы

$$Q(t) = Q_0(t)^{m+1} (61)$$

Воспользовавшись формулой 59, запишем

$$Q(t) = [1 - P_0(t)]^{m+1}$$
(62)

$$Q(t) = \left[1 - \prod_{i=1}^{n} P_{0i}(t)\right]^{m+1}$$
(63)

Резервированная система может находиться в одном из двух несовместимых состояний - работоспособном, когда хотя бы одна из цепей работоспособна, и отказа, когда отказали все m+1 цепи. Следовательно, математически это выглядит так: P(t) + Q(t) = 1.

В результате получаем, что вероятность безотказной работы системы с количеством цепей m+1 равна

$$Q(t) = 1 - \left[1 - \prod_{i=1}^{n} P_{0i}(t)\right]^{m+1}$$
(64)

В случае, когда $\lambda_i = const$, в каждой из цепей (поток отказов простейший)

выражение
$$\prod_{i=1}^n P_{0i}(t) = \prod_{n=1}^n e^{-\lambda_{0i} \cdot t} = e^{\lambda_0 \cdot t}$$
, где

$$\lambda_0 = \sum_{i=1}^n \lambda_{0i} = \dots = \sum_{i=1}^n \lambda_{ji} = \dots = \sum_{i=1}^n \lambda_{mi}$$
 (65)

Тогда вместо формулы 59 запишем

$$P(t) = 1 - (1 - e^{-\lambda_0 \cdot t})^{m+1}$$
(66)

где $e^{-\lambda_0 \cdot t} = P_0(t)$ - вероятность безотказной работы основной цепи.

Средняя наработка до отказа резервированной системы

$$T = \int_{0}^{\infty} P(t)dt = \int_{0}^{\infty} \left[1 - (1 - e^{-\lambda_0 \cdot t})^{m+1} \right] dt$$

После некоторых преобразований получим $T = \frac{1}{\lambda_0} \sum_{i=0}^{m} \frac{1}{j+1}$;

$$T = T_0 \cdot \sum_{j=0}^{m} \frac{1}{j+1} \tag{67}$$

Интенсивность отказов системы, как известно, определяется по выражению $\lambda(t) = -\frac{1}{P(t)} \cdot P'(t)$.

Для более наглядного представления выигрыша в надежности при использовании общего нагруженного резервирования с целой кратностью построим график зависимости:

$$P(t) = f[P_0(t), m] \tag{68}$$

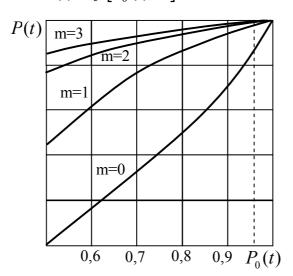


Рисунок 14 — Повышение вероятности безотказной работы системы при включении m резервных цепей

Из рисунка 14 видно, что если $P_0(t)$ имеет малое значение, к примеру $P_0(t) < 0.8$, то и при m > 2 просматривается существенное приращение надежности и. Однако с ростом надежности основной цепи $P_0(t)$ эффективность применения нескольких резервных ветвей резко снижается. Если надежность основной цепи $P_0(t) < 0.95$, то заметен существенный прирост P(t) при включении только одной резервной цепи.

3.6.2 Надежность системы с нагруженным дублированием

Способ нагруженного дублирования является частным случаем общего нагруженного резервирования с целой кратностью, m=1, то есть на одну основную цепь приходится одна резервная цепь, находящаяся под нагрузкой. На рисунке 15 изображена расчетная схема надежности.

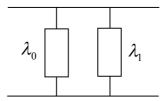


Рисунок 15 — Расчетная схема нагруженного дублирования ($\lambda_0 = \lambda_1 = const$)

Вероятность безотказной работы системы по формуле 69:

$$P(t) = 1 - \left[1 - P_0(t)\right]^2 \tag{69}$$

где $P_0(t)$ - вероятность безотказной работы основной цепи $P_0(t) = e^{-\lambda_0 \cdot t}$

Среднюю наработку до отказа системы определим в соответствии 67 $T = T_0 \cdot \left(1 + \frac{1}{1+1}\right) = 1, 5 \cdot T_0 \,.$

Определим зависимость интенсивности отказов системы от времени:

$$\lambda(t) = -\frac{1}{P(t)} \cdot P'(t) \tag{70}$$

Подставим в выражение 70 исходное выражение 69 и его производную. После некоторых упрощений получим:

$$\lambda(t) = 2 \cdot \lambda_0 \cdot \frac{(1 - e^{-\lambda_0 \cdot t}) \cdot e^{-\lambda_0 \cdot t}}{1 - (1 - e^{\lambda_0 \cdot t})^2} \tag{71}$$

Для построения графика $\lambda(t)$, показанного на рисунке 14, определим предельные значения этой функции: $\lambda_{(t=0)}=0$; $\lim_{t\to\infty}\lambda(t)=\lambda_0$.

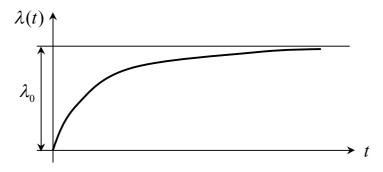


Рисунок 16 – Интенсивность отказов системы, работающей по способу нагруженного дублирования

Из рисунка видно, что интенсивность отказов системы со временем возрастает. Это говорит о том, что при большом t вероятность отказа одной из цепей высока, и система может перейти в режим работы с одним элементом $\lambda = \lambda_0$. Отметим также начальный этап (когда t-0). Эта система имеет очень высокую надежность ($\lambda(t)$ (ρ)0).

На рисунке 17 представлен график функции P(t), построенный по зависимости (69). Там же дан график $P_0(t)$ основной цепи (без резерва).

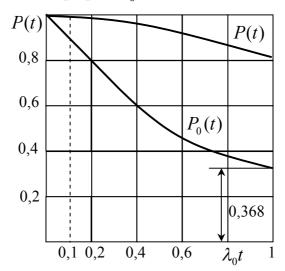


Рисунок 17 — Зависимость вероятностей безотказной работы основной цепи $P_0(t)$ и системы из двух элементов P(t) от $\lambda_0 t$.

Из рисунка 17 видно, на сколько повышается надежность системы (схемы), переведенной в режим нагруженного дублирования.

В заключение следует отметить, что если дублированную неремонтируемую систему включить на значительный срок без технического обслуживания, то уровень надежности системы окажется недопустимо низким.

3.6.3 Общее резервирование замещением

В технических системах широко используется метод повышения надежности системы за счет использования резервной цепи, находящейся в ненагру-

женном состоянии. Последняя автоматически включается при отказе основной цепи. Опираясь на результаты, описанные в предыдущем подразделе, проанализируем только вариант дублирования замещением, так как в большинстве случаев на практике оказывается достаточно одной резервной цепи.

Предположим, что приборы, обнаруживающие отказ основной цепи, и выключатели, отключающие отказавшую цепь и включающие резервную, также абсолютно надежны. Резервная ненагруженная цепь, находящаяся в режиме ожидания, своих характеристик не меняет и работоспособна. Каждая из цепей состоит из n последовательных элементов, рисунок 18. Поток отказов простейший.

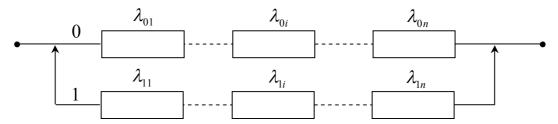


Рисунок 18 – Схема системы дублированной замещением

$$\lambda_{01} = \lambda_{11} = const$$
; $\lambda_{0i} = \lambda_{1i} = const$; $\lambda_{0n} = \lambda_{1n} = const$

Учитывая, что $\lambda_0 = \sum_{i=1}^n \lambda_{0i}$; $\lambda_1 = \sum_{i=1}^n \lambda_{1i}$; $\lambda_0 = \lambda_1$ анализируемая система (схема) приобретает вид, изображенный на рисунок 19.

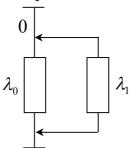


Рисунок 19 – Расчетная схема надежности при дублировании замещением

Рассмотрим события, которые могут произойти с системой на отрезке времени t. Проанализируем возможные гипотезы.

- 1. Основная цепь отработала успешно все время t и резервную цепь включать не потребовалось. Вероятность этого режима работы системы $P_0(t)$.
- 2. Основная цепь отработала только отрезок t и отказала. При этом сразу же включилась резервная цепь и успешно проработала до конца времени t с вероятностью безотказной работы $P_1(t-\tau)$.

Чтобы заработал второй режим необходимо совпадение двух событий - отказ основной цепи и успешная работа включенной под нагрузку резервной цепи. Математической оценкой совпадения этих событий является произведение их вероятностей. На рисунке 20 изображен график плотности вероятности

появления отказа основной цепи $f_0(t)$. Выделим достаточно малый интервал $d\tau$, следующий за отрезком τ . Произведение $f_0(\tau)d\tau = g_0(d\tau)$. Заштрихованная площадка, численно равна вероятности отказа основной цепи на интервале $d\tau$. Выражение $P_1(t-\tau) \cdot f_0(\tau) \cdot d\tau$ представляет собой математическую оценку факта отказа основной цепи и успешного вхождения в работу резервной цепи в MOMEHT $(t-\tau)$.

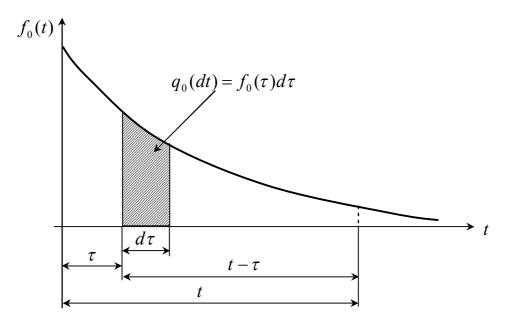


Рисунок 20 – График плотности вероятности появления отказа основной цепи.

В соответствии с формулой полной вероятности вероятность безотказной работы анализируемой системы в течение времени t определяется по выражению: $P(t) = P_0(t) + P_{1/0}(t,\tau)$,

где $P_{1/0}(t, au)$ - вероятность безотказной работы цепи "1" в течение времени tпри условии, что отказ основной цепи "0" произошел в момент τ (на интервале $\Delta \tau$).

Исходя из условия, что резервная цепь "1" до момента включения своей надежности не теряет, то есть работоспособна, а отказ основной цепи с последующим мгновенным включением резервной цепи может произойти на интервале от 0 до t

$$P_{1/0}(t,\tau) = \int_{0}^{t} P_{1}(t-\tau) \cdot f_{0}(\tau) d\tau$$
 (72)

Таким образом, учитывая обе гипотезы, на основе формулы полной вероятности запишем выражение вероятности безотказной работы системы

$$P(t) = P_0(t) + \int_0^t P_1 \cdot (t - \tau) \cdot f_0(\tau) d\tau \tag{73}$$
 Зная, что
$$P_1(t - \tau) = e^{-\lambda_0 \cdot (t - \tau)}; P_0(t) = e^{-\lambda_0 \cdot t}; \quad f_0(\tau) = -P_0'(\tau) = \lambda_0 \cdot e^{-\lambda_0(\tau)},$$

получим

$$P(t) = (1 + \lambda_0 \cdot t) \cdot e^{-\lambda_0 \cdot t} \tag{74}$$

$$T = \int_{0}^{\infty} P(t)dt = 2\frac{1}{\lambda_0} = 2 \cdot T_0$$
 (75)

а интенсивность отказов системы $\lambda(t) = -\frac{1}{P(t)} \cdot P'(t)$.

Используя выражение 74 после некоторых преобразований, получим

$$\lambda(t) = \lambda_0 \cdot \frac{\lambda_0 \cdot t}{1 + \lambda_0 \cdot t} \tag{76}$$

На рисунке 21 изображен график интенсивности отказов системы, дублированный по способу замещения. Из формулы 76 видно, как эта функция монотонно возрастает от $\lambda_{(t=0)}=0$ до $\lambda_{(t\to\infty)}=\lambda_0$; $\lim_{t\to\infty}\lambda(t)=\lambda_0$.

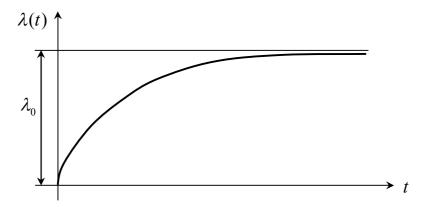


Рисунок $21 - \Gamma$ рафик функции $\lambda(t)$ системы дублированной замещением

В первоначальный момент времени интенсивность отказов дублированной системы, очень низкая $\lambda_0 >> \lambda_{(t=0)}$. Если такую дублированную систему включить на длительный срок, то выигрыш в надежности уменьшается. Это легко объясняется тем, что с увеличением времени возрастает вероятность отказа основной цепи. При ее отказе вводится в работу резервная цепь с интенсивностью отказов λ_0 .

Сравнивая графики $\lambda(t)$ для систем нагруженного дублирования (рисунок 16) и дублирование замещением (рисунок 21) видим, что они похожи друг на друга: на начальном этапе работы надежность их высока. На практике, важно знать, какой из схем следует отдать предпочтение. Для этого построим график, на котором изображены кривые P(t) системы при различных способах дублирования (рисунок 22).

На интервале $\lambda_0 t < 0,1$ обе схемы, нагруженного дублирования и дублирования замещением, при одном и том же оборудовании по уровню надежности практически идентичны. В практических условиях эту разницу ощутить очень трудно. Так, если средняя наработка до отказа основной цепи $T_0 = 5$ годам и время рабочего цикла до планового отключения системы составляет t = 0,25

года (один раз в квартал), то $\lambda_0 \cdot t = \frac{1}{T_0} \cdot 0,25 = 0,05$ 1/год. При этом вероятность безотказной работы схемы нагруженного дублирования $P_{(0,25)} = 0,9987$, а вероятность безотказной работы схемы дублирования замещением составит $P_{(0,25)} = 0,999$.

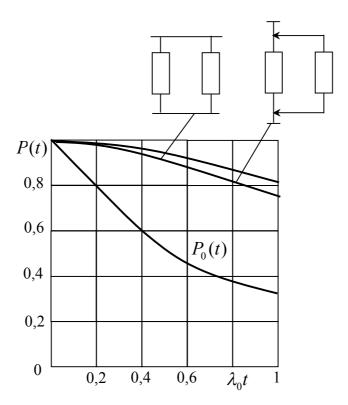


Рисунок 22 – Надежность системы при различных способах дублирования

В этих условиях выбор схемы включения системы может определить экономический фактор.

В заключение отметим, что если возникнет необходимость оценки надежности системы, включенной по схеме общего резервирования замещением с целой кратностью, при m > 1, то следует пользоваться расчетными формулами:

$$P(t) = e^{-\lambda_0 \cdot t} \sum_{j=0}^m \frac{\left(\lambda_0 \cdot t\right)^j}{j \cdot !}$$
,где $j = 0, 1, \dots m$; $T = \frac{1}{\lambda_0} (m+1) = T_0 \cdot (m+1)$.

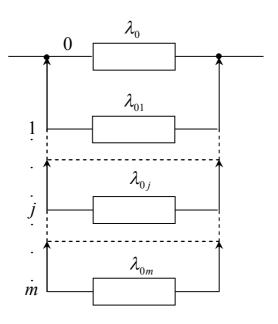


Рисунок 23 — Расчетная схема надежности с общим резервированным замещением: $\lambda_0 = \lambda_{0,i}$; $1 \le j \le m$

Предположим, система имеет три резервных цепи (m=3), $\lambda_0=10^{-4}\,1/v\,ac$. Тогда для $t=1000\,vac$

$$\begin{split} P_{m=3}(t) &= e^{-\lambda_0 \cdot t} \cdot \left[\frac{(\lambda_0 \cdot t)^0}{0!} + \frac{(\lambda_0 \cdot t)^1}{1!} + \frac{(\lambda_0 \cdot t)^2}{2!} + \frac{(\lambda_0 \cdot t)^3}{3!} \right]; \\ T_{m=3} &= \frac{1}{\lambda_0} (3+1) = 4T_0 \\ P_{m=3}(1000) &= e^{10^{-4} \cdot 10^3} \cdot \left[1 + \frac{(10^{-4} \cdot 10^3)}{1} + \frac{\left(10^{-4} \cdot 10^3\right)^2}{2} + \frac{\left(10^{-4} \cdot 10^3\right)^3}{6} \right] = \\ &= e^{-0,1} \cdot \left[1 + \frac{0,1}{1} + \frac{(0,1)^2}{2} + \frac{(0,1)^3}{6} \right] = 0,9048 \cdot 1,10517 = 0,999955 \\ \text{Итак, } P_0(1000) &= 0,905 \; ; \; T_0 = \frac{1}{\lambda_0} = 10^4 \, \text{vac} \; , \\ P_{m=3}(1000) &= 0,999955 \; ; \; T_{m=3} = 4T_0 = 4 \cdot 10^4 \, \text{vac} \end{split}$$

3.6.4 Надежность системы при раздельном резервировании и с целой кратностью по всем элементам

Расчетная схема надежности для этого случая изображена на рисунке 24.

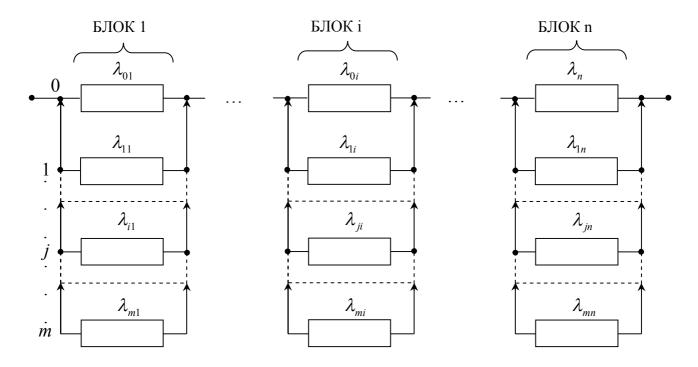


Рисунок 24 — Расчетная схема надежности системы с раздельным резервированием: $\lambda_{01} = \lambda_{i1}$; $\lambda_{0i} = \lambda_{ii}$ при $1 \le j \le m$; $\lambda_{0n} = \lambda_{in}$

Отказ этой системы может произойти при отказе любого блока. Совпадение работоспособных состояний n блоков системы гарантирует работоспособное состояние системы. Следовательно, если известны вероятности безотказной работы каждого из блоков, то вероятность безотказной работы системы выражается формулой:

$$P(t) = P_{\delta_{n.1}}(t)...P_{\delta_{n.k}}(t)...P_{\delta_{n.n}}(t) = \prod_{k=1}^{n} P_{\delta_{n.k}}(t)$$
 (72)

Воспользуемся результатом расчетов в подразделе 3.6.1. При преобразовании схемы представленной на рисунке 13, в более удобную схему на рисунке 23 вероятность безотказной работы каждой из цепей определяется по формуле 42. Для элементов схемы на рисунке 24 принято:

$$\lambda_0 = \lambda_1 = \dots = \lambda_j = \dots = \lambda_m = const; \ P_{\delta n}(t) = 1 - \left[1 - e^{-\lambda_0 \cdot t}\right]^{m+1}; \ \lambda_0 = \sum_{i=1}^n \lambda_{0i}.$$

Сравнивая структуру одного блока схемы по рисункам 23 и 24 видим, что они идентичны. Следовательно, вероятность безотказной работы системы при раздельном резервировании с целой кратностью определится по выражению произведения вероятностей безотказной работы блоков:

$$P(t) = \prod_{k=1}^{n} \left\{ 1 - \left[1 - e^{-\lambda_{0k}} \right]^{m_k + 1} \right\}$$
 (73)

где λ_{0k} - интенсивность отказов основного элемента k -го блока; выражение в фигурных скобках - вероятность безотказной работы k -го блока.

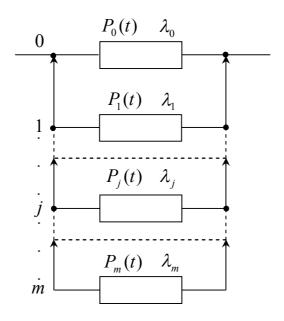


Рисунок 25 — К определению $P_{\delta n}(t)$ $\lambda_0 = \lambda_j$ при $1 \le j \le m$

Среднее время наработки до отказа соответственно найдется по выраже-

нию
$$T = \int_{0}^{\infty} P(t)dt$$
.

При равнонадежных элементах и одинаковой кратности их резервирования по всем блокам расчетные выражения оценки важнейших показателей надежности такой системы примут вид:

$$P(t) = \left[1 - (1 - e^{-\lambda_0 \cdot t})^{m+1}\right]^n \tag{74}$$

где $\lambda_0 = const$ для всех элементов системы.

$$T = \int_{0}^{\infty} P(t)dt = \frac{(n-1)\cdot !}{\lambda_{0} \cdot (m+1)} \cdot \sum_{j=0}^{m} \frac{1}{y_{j} \cdot (y_{j}+1)...(y_{j}+n-1)}$$
(75)

где
$$y_j = \frac{j+1}{m+1}$$
.

3.6.5 Резервирование в мажоритарных системах

К классу мажоритарных относятся резервированные системы, которые функционируют только в том случае, когда из n имеющихся элементов системы минимальное число m (m < n) элементов должно находиться в работоспособном состоянии. К мажоритарным системам можно отнести АСУ ТП (верхний уровень) состоящую из трех рабочих станций (на базе промышленных компьютерных контроллеров), для нормальной работоспособности которой необходимо, чтобы из трех рабочих станций в работоспособном состоянии находились две.

К мажоритарным системам относятся логические и цифровые устройства, состоящие из 2m+1 (m=1,2,...) равнонадежных элементов и абсолютно на-

дежного кворум-реле, на входе которого формируется сигнал y (обычно y = 1) при поступлении m + 1 и более сигналов X_i (рисунок 26).

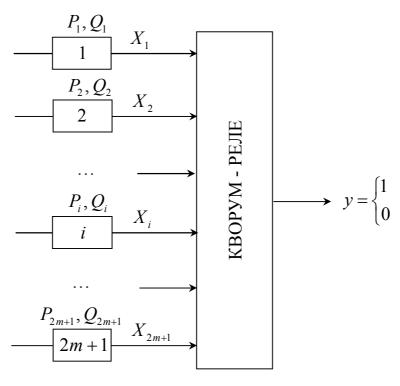


Рисунок 26 – Структурная схема мажоритарной системы.

Число элементов в системе выбирается не из соображений её надежности, а из-за необходимости обработки сигналов X_i , (i=1,...2m+1) и объективного получения решения y=1 или y=0, поэтому представляет интерес зависимости показателей надежности М-системы T_H^C , $P_C(t)$, коэффициентов эффективности «резервирования» K_p и K_Q от числа используемых элементов. Коэффициент эффективности K_P определяется как отношение вероятности безотказной работы системы к вероятности безотказной работы одного элемента $K_p = \frac{P_C}{P}$.

Если $K_p > 1$ – система более надежна, чем один элемент.

Если $K_p = 1$ — резервирование не повышает надежности системы.

Если $K_p < 1$ — система менее надежна, чем один элемент.

3.7 Надежность восстанавливаемых систем

Сложные технические объекты (системы), рассчитанные на длительный срок службы, создаются, как правило, ремонтируемыми. В разделе 2 дано толкование основных показателей надежности восстанавливаемых объектов (элементов): средняя наработка на отказ; параметр потока отказов; среднее время восстановления; интенсивность восстановления; коэффициенты готовности и оперативной готовности. В данном разделе рассматривается методика анализа

надежности восстанавливаемых систем при различных схемах включения элементов.

Переход системы из неработоспособного (предельного) состояния в работоспособное осуществляется с помощью операций восстановления или ремонта. К первым, в основном, относятся операции идентификации отказа (определение его места и характера), замены, регулирования, заключительных операций контроля работоспособности системы в целом. Переход системы из предельного состояния в работоспособное осуществляется с помощью ремонта, при котором происходит восстановление ресурса системы в целом.

3.7.1 Надежность восстанавливаемой одноэлементной системы

При анализе используем ряд наиболее часто вводимых допущений.

- 1. Поток отказов в системе простейший, то есть выполняются требования ординарности, стационарности и отсутствия последствия ($\omega = \lambda = const$) (см. 2.1.5).
- 2. Поток восстановлений простейший, то есть $\mu = \frac{1}{\tau_B} = const$ (см. 2.3.2).
- 3. Восстановление происходит путем ремонта или замены с последующей настройкой и проверкой работоспособности или исправности системы за одно и то же время τ_R .

Расчетная схема надежности восстанавливаемой одноэлементной системы представлена на рисунке 27.

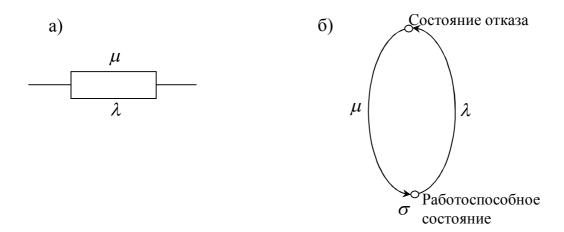


Рисунок 27 – К расчету надежности восстанавливаемой основной системы: а – расчетная схема; б – схема функционирования

Данная система с интенсивностью λ стремится принять состояние отказа, а с интенсивностью μ - перейти в работоспособное состояние.

Обозначим устойчивые состояния системы индексами:

- 1 отказ, то есть система находится в состоянии восстановления с интенсивностью восстановления $\mu = const$;
- 0 работоспособное состояние с параметром потока отказов $\omega = const$, $\omega = \lambda$.

Для анализируемой системы с учетом принятых допущений возможны четыре вида перехода из состояния в момент времени t в состояние в момент времени $(t+D\cdot t)$ показанные на рисунке 28:

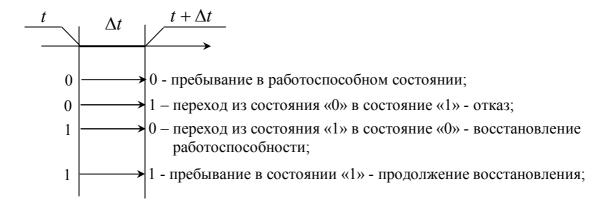


Рисунок 28 – Виды переходов состояний

Указанные переходы можно представить в виде графа перехода состояний системы с восстановлением в соответствии с рисунком 29.

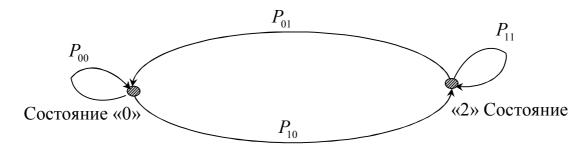


Рисунок 29 – Граф состояний системы

Графу перехода состояний соответствует матрица переходных вероятностей 2x2:

$$\begin{vmatrix} P_{00}(\Delta t) & P_{01}(\Delta t) \\ P_{10}(\Delta t) & P_{11}(\Delta t) \end{vmatrix}$$
 (76)

Диагональные элементы этой матрицы соответственно определятся как вероятность безотказной работы на отрезке Δt : $P_{00}(\Delta t) = e^{-\lambda \Delta t}$ и вероятность продолжения восстановления системы на отрезке Δt : $P_{11}(\Delta t) = e^{\mu \Delta t}$.

Воспользуемся формулой разложения функции в ряд:

$$e^{-x} = 1 - x + \frac{x^2}{2!} - \frac{x^3}{3!} + \dots = \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k \cdot \frac{x^k}{k!}.$$

В высоконадежных элементах $\lambda < 10^{-5} \, 1/u\,ac$, тогда при разложении в ряд функции $P_{00}(\Delta t)$, сохраняя высокую точность расчета можно ограничиться только двумя первыми членами ряда. Пусть $\lambda = 10^{-4} \, 1/u\,ac$, $\Delta t = 1$ час, тогда

$$e^{-\lambda \Delta t} = 1 - 10^{-4} + \frac{10^{-8}}{2} - \frac{10^{-12}}{6} + \dots + 0(\Delta t) \rightarrow 0$$

Таким образом, запишем $P_{00}(\Delta t) = e^{-\lambda \Delta t} = 1 - \lambda \Delta t + O(\Delta t)$.

Соответственно $P_{11}(\Delta t) = 1 - \mu(\Delta t) + 0(\Delta t)$.

Из свойств матрицы следует, что сумма элементов каждой строки матрицы равна единице, как сумма вероятностей появления несовместимых составляющих полную группу событий, откуда следует: $P_{00}(\Delta t) + P_{01}(\Delta t) = 1$; $P_{01} = 1 - P_{00}(\Delta t) = \lambda \Delta t + O(\Delta t)$;

$$P_{11}(\Delta t) + P_{10}(\Delta t) = 1$$
; $P_{10} = 1 - P_{11}(\Delta t) = \mu \Delta t + 0(\Delta t)$.

Для составления уравнений вероятностей состояний системы следует записать формулу полной вероятности для каждого столбца матрицы:

$$P_0(t+\Delta t) = P_0(t) \cdot P_{00}(\Delta t) + P_1(t) \cdot P_{10}(\Delta t)$$
 - для первого столбца;

$$P_1(t+\Delta t) = P_0(t) \cdot P_{01}(\Delta t) + P_1(t) \cdot P_{11}(\Delta t)$$
 - для второго столбца,

где $P_0(t)$ - вероятность нахождения системы в нулевом (работоспособном) состоянии в момент времени t;

 $P_1(t)$ - вероятность нахождения системы в состоянии "1" (отказа) в момент времени t .

Используем запись производной функции f(x):

$$f'(x) = \lim_{\Delta x \to 0} \frac{f(x + \Delta t) - f(x)}{\Delta x}$$

и по аналогии с этим выражением для нашего случая запишем:

$$P_0'(t) = \lim_{\Delta x \to 0} \frac{P_0(t + \Delta t) - P_0(t)}{\Delta t}, \ P_1'(t) = \lim_{\Delta x \to 0} \frac{P_1(t + \Delta t) - P_1(t)}{\Delta t}.$$

В эти выражения подставим раскрытые формулы полных вероятностей $P_0(t+\Delta t)$ и $P_1(t+\Delta t)$, произведем соответствующие преобразования и получим систему двух дифференциальных уравнений относительно вероятностей пребывания системы в состояниях "0" и "1":

$$P_0'(t) = -\lambda \cdot P_0(t) + \mu \cdot P_1(t); \ P_0'(t) = -\lambda \cdot P_0(t) - \mu \cdot P_1(t)$$
 (77)

При начальных условиях $P_0(t=0)=1$; $P_1(t=0)=0$ в начальный момент времени (t=0) восстанавливаемая система работоспособна - находится в состоянии "0". Решение дифференциальных уравнений дает

$$P_0(t) = G(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \cdot \left[1 + \frac{\lambda}{\mu} \cdot e^{-(\lambda + \mu) \cdot t} \right]$$
 (78)

Вероятность работоспособного состояния системы в момент времени t представляет собой функцию готовности G(t). Функция готовности: это вероятность работоспособного состояния восстанавливаемой системы в определенный момент времени t. Этот показатель является комплексным показателем надежности, оценивающим два свойства системы - безотказность и ремонтопригодность. Заметим, что G(t) дает оценку не за весь период от 0 до t, а толь-

ко в заданный момент времени t, поскольку до этого система могла находиться как в работоспособном (0), так и в неработоспособном (1) состояниях.

На рисунке 30 построен график: $G(t) = f(\lambda \cdot t)$ при $\frac{\lambda}{\mu} = const$.

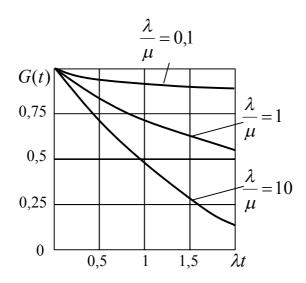


Рисунок 30 — Функция готовности восстанавливаемой системы без резервирования при различных значениях $\frac{\lambda}{u}$

Предположив $\lambda = const$, можно наглядно увидеть, насколько повысится надежность системы за счет увеличения μ (сокращения времени восстановления τ_B) для определенного времени t. Например, при увеличении m в десять раз для момента $\lambda \cdot t = 1$ надежность повысится с G(t) = 0,41 до G(t) = 0,95. Для высоконадежных систем, к примеру, трансформатора, когда: $\lambda < 10^{-5} \, 1/u\,ac$, $\mu < 10^{-2} \, 1/u\,ac$, оценку надежности целесообразно определять за год эксплуатации. В этом случае удобно пользоваться коэффициентом готовности.

Определим предельное значение G(t) по выражению 79

$$\lim_{t \to \infty} G(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} = K_{\Gamma} \tag{79}$$

Асимптотическое значение функции готовности при $t(p) \infty$ и есть коэффициент готовности.

Таким образом, коэффициент готовности представляет собой вероятность того, что система окажется работоспособной в произвольный момент времени, кроме планируемых периодов, в течение которых использование системы по назначению не предусматривается.

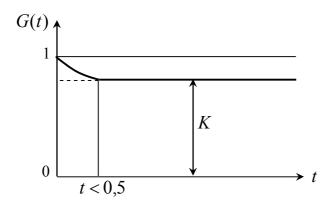


Рисунок 31 — Функция готовности при $\lambda = const$ и M = const.

Пример

Имеется восстанавливаемая система, у которой параметр потока отказов $\lambda=10^{-5}\ 1/uac=const$, средняя интенсивность восстановления $\mu=10^{-2}\ 1/uac$. Определить, на сколько повысится надежность этой системы за счет более высокой организации работы ремонтного персонала, если интенсивность восстановления системы повысилась вдвое (сократилось вдвое время восстановления).

Решение:

 $au_{\it B_1}$ = $100\, vac$; $au_{\it B_2}$ = $50\, vac$. Коэффициент готовности системы до улучшения организации труда ремонтного персонала составлял

$$K_{\Gamma_1} = \frac{\mu}{\lambda + \mu} = \frac{10^{-2}}{10^{-5} + 10^{-2}} = \frac{0.01}{0.00001 + 0.01} = 0.999$$
.

При улучшенной организации труда

$$K_{\Gamma_2} = \frac{2\mu}{\lambda + 2\mu} = \frac{2 \cdot 10^{-2}}{10^{-5} + 2 \cdot 10^{-2}} = \frac{0,02}{0,00001 + 0,02} = 0,9995.$$

По сумме затрат, связанных с улучшением организации труда и экономического эффекта от повышения надежности (улучшения ремонтопригодности), можно сделать вывод о целесообразности такого способа повышения надежности системы.

3.7.2 Надежность нерезервированной системы с последовательно включенными восстанавливаемыми элементами

Система, состоящая из N последовательных восстанавливаемых элементов, отказывает, когда отказывает любой из элементов системы. Предполагаются простейшие потоки отказов и восстановлений $\lambda_i = const$, $\mu_i = const$. Как показано, при заданных допущениях и известных значениях коэффициентов готовности каждого из последовательно включенных элементов K_{Γ_i} , коэффициент готовности системы определяется по выражению

$$K_{\Gamma} = \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^{n} \left(\frac{1}{K_{\Gamma_{i}}} - 1\right)}; K_{\Gamma_{i}} = \frac{\mu_{i}}{\lambda_{i} + \mu_{i}}$$
(80)

и соответственно при заданных λ_i , μ_i $K_{\Gamma} = \frac{1}{1 + \sum \frac{\lambda_i}{\mu_i}}$.

Пример

Восстанавливаемая система состоит из трех последовательно включенных элементов с параметрами надежности: $K_{\varGamma_1}=0,6$; $K_{\varGamma_2}=0,8$; $K_{\varGamma_3}=0,7$. Известно, что $\lambda_i=const$, $\mu_i=const$.

Определить коэффициент надежности.

Решение:

Подставив заданные значения коэффициентов готовности в выражение K_{Γ} системы, получим $K_{\Gamma} = \frac{1}{1 + \left[\left(\frac{1}{0.6} - 1\right) + \left(\frac{1}{0.8} - 1\right) + \left(\frac{1}{0.7} - 1\right)\right]} = 0,4$.

Здесь же отметим, что в расчетной практике нередко пользуются формулой вероятности безотказной работы неремонтируемой системы с основным соединением элементов, когда $P(t) = P_1(t) \cdot P_2(t) \cdot P_3(t)$.

В этом случае $K_{\Gamma} = K_{\Gamma 1} \cdot K_{\Gamma 2} \cdot K_{\Gamma 3} = 0,6 \cdot 0,8 \cdot 0,7 = 0,335$, что, как видим, сопряжено с грубой ошибкой. Произведение вероятностей безотказной работы элементов неремонтируемой системы есть математическая оценка факта совпадения работоспособного состояния трех, составляющих систему невосстанавливаемых элементов, то есть работоспособного состояния системы. Произведение коэффициентов готовности ремонтируемых элементов факта совпадения работоспособных состояний элементов не отражает.

3.7.3 Надежность восстанавливаемой дублированной системы

Рассмотрим систему, для обеспечения надежности которой используется дублирование: основной системе добавляется параллельно такая же система. В обеих системах (цепях) параметры потоков отказов одинаковы, $\lambda = const$, такая же картина и для потока восстановлений, то есть $\mu = const$. Такая дублированная система может находиться в трех состояниях:

"0" - обе системы (цепи) работоспособны;

"1" - одна цепь восстанавливается, другая работоспособна;

"2" - обе цепи восстанавливаются.

С точки зрения выполнения функциональных задач, возложенных на систему, состояние "2" соответствует отказу. У этой системы возможны семь видов перехода из состояния в момент времени t в состояние в момент времени $t+\Delta t$ в соответствии с рисунком 32:

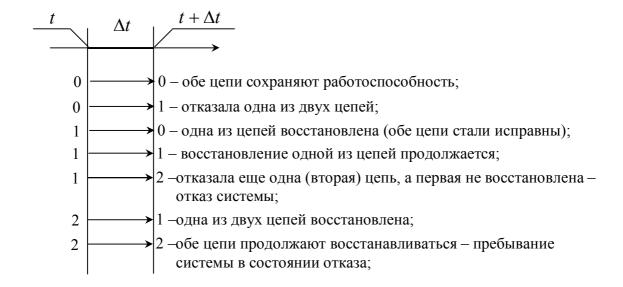
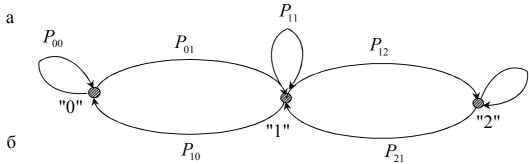


Рисунок 32 – Виды переходов состояний

Указанные переходы изображены на рисунке 33 в виде графа переходов состояний.



$$P_{00}(\Delta t) \ P_{01}(\Delta t) \ 0(\Delta t); \ P_{10}(\Delta t) \ P_{11}(\Delta t) \ P_{12}(\Delta t); \ 0(\Delta t) \ P_{21}(\Delta t) \ P_{22}(\Delta t)$$

Рисунок 33 – К расчету надежности восстанавливаемой дублированной системы: а – граф переходов состояний дублированной системы; б – матрица переходных вероятностей

Графу переходов соответствует матрица переходных вероятностей 3×3 . Крайние элементы побочной диагонали матрицы имеют порядок $0(\Delta t)$, так как по исходному предположению поток отказов в системе простейший, и время восстановления распределено по экспоненциальному закону. Согласно простейшему потоку в первой строке матрицы исключается ситуация, когда за время Δt система может перейти из состояния "0" в состояние "2", $P_{02}(\Delta t)=0$. Рассуждая аналогично, по третьей строке матрицы запишем $P_{20}(\Delta t)=0$. При простейшем потоке система за время Δt может из состояния "0" с вероятностью $P_{01}(\Delta t)$ перейти в состояние "1" или с вероятностью $P_{00}(\Delta t)$ остаться в состоянии "0". Точно такая же картина соответствует состоянию "2". С вероятностью $P_{21}(\Delta t)$ система может перейти в состояние "1" (одна цепь восстановится)

или с вероятностью $P_{22}(\Delta t)$ останется пребывать в состоянии "2" (обе цепи неработоспособны - состояние отказа). Элементы первой строки матрицы переходных вероятностей зависят от режима использования резервной цепи. Так при нагруженном резерве, работающих обеих цепях, интенсивность потока отказов равна $2 \cdot \lambda$, а при ненагруженном - λ (ненагруженная цепь всегда готова к работе и своих характеристик не меняет, $\lambda = const$), поэтому

$$P_{00}(\Delta t) = e^{-(y+1)\lambda \cdot \Delta t} \tag{81}$$

где y - коэффициент, учитывающий состояние резерва (y=0 при ненагруженном режиме и y=1 при нагруженном). Используя разложение степенной функции в ряд, с учетом приближения суммы отброшенных членов ряда к нулю, запишем:

$$P_{00}(\Delta t) = 1 - (y+1) \cdot \lambda \cdot \Delta t \tag{82}$$

С учетом того, что для первой строки матрицы $P_{00}(\Delta t) + P_{01}(\Delta t) = 1$, получим

$$P_{01}(\Delta t) = 1 - P_{00}(\Delta t) = (y+1) \cdot \lambda \cdot \Delta t$$
 (83)

Элементы второй строки матрицы переходных вероятностей соответственно запишутся так: $P_{10}(\Delta t) + P_{11}(\Delta t) + P_{12}(\Delta t) = 1$;

$$P_{10}(\Delta t) = 1 - e^{-\mu \cdot \Delta t} = \mu \cdot \Delta t; \qquad (84)$$

$$P_{12}(\Delta t) = 1 - e^{-\lambda \cdot \Delta t} = \lambda \cdot \Delta t ; \qquad (85)$$

$$P_{11}(\Delta t) = 1 - [P_{10}(\Delta t) + P_{12}(\Delta t)] = 1 - (\lambda + \mu) \cdot \Delta t$$
 (86)

Элементы третьей строки анализируемой матрицы, с учетом количества ремонтных бригад и многократного восстановления отказавших цепей соответственно определятся так: $P_{21}(\Delta t) + P_{22}(\Delta t) = 1$;

$$P_{22}(\Delta t) = e^{-r \cdot \mu \cdot \Delta t} = 1 - r \cdot \mu \cdot \Delta t; \qquad (87)$$

$$P_{21}(\Delta t) = 1 - P_{22}(\Delta t) = r \cdot \mu \cdot \Delta t \tag{88}$$

где r - число ремонтных бригад (r = 1 или r = 2).

При дублировании с восстановлением возможны шесть вариантов задач анализа надежности такой системы:

- 1) система с нагруженным резервом до первого отказа (y = 1, r = 0);
- 2) система с ненагруженным резервом до первого отказа (y = 0, r = 0);
- 3) многократно восстанавливаемая система с нагруженным резервом и одной ремонтной бригадой (y = 1, r = 1);
- 4) многократно восстанавливаемая система с нагруженным резервом и двумя ремонтными бригадами (y = 1, r = 2);
- 5) многократно восстанавливаемая система с ненагруженным резервом и двумя ремонтными бригадами (y = 1 , r = 2);
- 6) многократно восстанавливаемая система с ненагруженным резервом и одной ремонтной бригадой ($y=0\,,\,r=1$).

Для определения $P_0(t)$, $P_1(t)$, $P_2(t) = f(\lambda, \mu, r, y, t)$ необходимо составить и решить систему трех дифференциальных уравнений: $P_0'(t) = f(\lambda, \mu, r, y, t)$;

$$P'_{1}(t) = f(\lambda, \mu, r, y, t)$$

$$P'_{2}(t) = f(\lambda, \mu, r, y, t)$$
(89)

где λ, μ, r, y - постоянные коэффициенты.

Для этого на основе свойств столбцов матрицы необходимо записать выражения формул полных вероятностей $P_0(t+\Delta t)$, $P_1(t+\Delta t)$, $P_2(t+\Delta t)$, затем записать производные для выражений вероятностей нахождения системы в состояниях "0", "1", "2" и свести их в систему уравнений:

$$P_{0}'(t) = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{P_{0}(t + \Delta t) - P_{0}(t)}{\Delta t};$$

$$P_{1}'(t) = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{P_{1}(t + \Delta t) - P_{1}(t)}{\Delta t};$$

$$P_{2}'(t) = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{P_{2}(t + \Delta t) - P_{2}(t)}{\Delta t}.$$
(90)

Формулы полных вероятностей запишутся на основе матрицы соответственно:

по первому столбцу
$$P_0(t+\Delta t)=P_0(t)\cdot P_{00}(\Delta t)+P_1t\cdot P_{10}(\Delta t)$$
 , по второму столбцу $P_1(t+\Delta t)=P_1(t)\cdot P_{11}(\Delta t)+P_0(t)\cdot P_{01}(\Delta t)+P_2(t)\cdot P_{21}(\Delta t)$; по третьему столбцу $P_2(t+\Delta t)=P_2(t)\cdot P_{22}(\Delta t)+P_1(t)\cdot P_{12}(\Delta t)$.

Подставив в эти выражения соответствующие значения переходных вероятностей, получим систему из трех дифференциальных уравнений с четырьмя постоянными коэффициентами λ, μ, r, y .

Определение искомых вероятностей пребывания системы в состояниях "0", "1" и "2" в момент времени t производится при следующих начальных условиях: $P_0(t=0)=1$; $P_1(t=0)=0$; $P_2(t=0)=0$, то есть система первоначально включается в работу с обоими исправными цепями. Решение системы подробно изложено в специальной литературе.

Искомое выражение функции готовности анализируемой системы при найденных значениях $P_0(t)$, $P_1(t)$, $P_2(t)$ на основе известного свойства $P_0(t) + P_1(t) + P_2(t) = 1$ удобнее записать в виде: $G(t) = 1 - P_2(t)$.

Анализируемая система получается высоконадежной. Даже в нерезервированной восстанавливаемой системе при $\frac{\lambda}{\mu} \le 0.01$ $G(t \ge 0.5 \, coda) \ge 0.999$ зна-

чение этой функции быстро приближается к коэффициенту готовности. В связи со сказанным, оценку надежности ответственных систем, рассчитанных на длительный срок эксплуатации, целесообразно производить с помощью коэффициента готовности.

Используя данные, запишем коэффициенты готовности дублированной системы с многократным восстановлением с одной (r=1) и двумя (r=2) ремонтными бригадами:

$$K_{\Gamma(r=1)} = \frac{(y+1)\cdot\lambda\cdot\mu+\mu^2}{(y+1)\cdot\lambda^2+(y+1)\cdot\lambda\cdot\mu+\mu^2};$$

$$K_{\Gamma(r=2)} = \frac{2 \cdot (y+1) \cdot \lambda \cdot \mu + 2\mu^2}{(y+1) \cdot \lambda^2 + 2 \cdot (y+1) \cdot \lambda \cdot \mu + 2 \cdot \mu^2}.$$

На рисунке 34 представлены графики коэффициента готовности $K_{\varGamma} = f \bigg(\frac{\lambda}{\mu} \bigg)$ для различных схем использования резерва и количества ремонтных бригад.

Из графика видно, что введение резервирования в восстанавливаемую систему дает существенное приращение надежности системы при относительно невысокой надежности основной цепи. К примеру, при $\frac{\lambda}{\mu} \ge 0,1$ заметен прирост надежности даже при введении второй ремонтной бригады (r=2). Но по мере роста надежности исходных цепей эффект от введения второй бригады снижается, а при $\frac{\lambda}{\mu} \le 0,01$ на графике уже невозможно увидеть различия значений коэффициента готовности не только при изменении количества ремонтных бригад, но и при переходе со схемы нагруженного дублирования к дублированию замещением. Так при $\frac{\lambda}{\mu} \le 0,01$ отношение значения коэффициента готовности схемы дублированной замещением к значению коэффициента готовности схемы нагруженного дублирования при одной ремонтной бригаде в обоих вариантах равно: $\frac{K_{\Gamma}(r=1,y=0)}{K_{\tau}(r=1,y=1)} = 1,0001$.

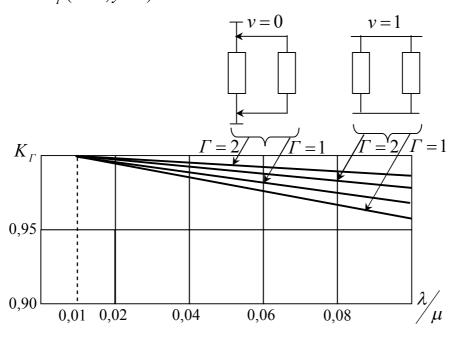


Рисунок 34 — Зависимость коэффициента готовности резервируемой дублированной системы $K_{\Gamma} = f \binom{\lambda}{\mu}$ при y = const и $\tau = const$

3.8 Анализ показателей надежности по экспериментальным данным

В предыдущих разделах производилась оценка надежности объектов (систем), исходя из того, что исходные показатели надежности элементов, составляющих систему, известны. Между тем, как уже отмечалось, надежность закладывается при проектировании, обеспечивается при изготовлении и поддерживается в эксплуатации. На каждом из этапов жизненного цикла объекта необходимо оценивать его фактическую надежность, для этого требуются экспериментальные данные. В эксплуатации персонал располагает паспортными исходными показателями надежности элементов, составляющих объект (систему). Для того, чтобы оценить фактические долговечность, безотказность, ремонтопригодность и сравнить их с параметрами завода-изготовителя необходимы данные, полученные в условиях эксплуатации. Важным источником информации о надежности является система сбора данных о работе объектов в процессе эксплуатации.

3.8.1. Документация для сбора первичной информации

Для обеспечения единства исходных данных о надежности первичная информация об отказе, в соответствии с существующей нормативнотехнической документацией, должна содержать определенные информационные признаки: дату возникновения отказа или неисправности; общую наработку объекта с начала его эксплуатации до момента установления отказа (определения неисправности); внешние признаки и характер появления отказа или неисправности; условия эксплуатации и вид работы, при которых был обнаружен отказ или установлена неисправность; способ устранения неисправности; принятые или рекомендованные меры по предупреждению возникновения отказов или неисправностей. Сбор информации и заполнение первичной документации о надежности проводятся в обычных условиях обслуживающим персоналом, а при опытной и подконтрольной эксплуатации - либо дежурным персоналом, либо представителями службы (группы) надежности, организованной специально для сбора информации о надежности.

Основными видами документации при сборе первичной информации об отказах элементов системы являются журналы, формуляры, карточки. В журналах фиксируется информация о надежности всех элементов подконтрольной системы. Формуляры ведутся на каждый объект (устройство). Их преимущество заключается в том, что они содержат всю информацию о работе устройства с момента его установки. Карточки являются наиболее оперативной формой информации. Они заполняются при каждом отказе. Информация, отраженная в карточках, лучше всего подготовлена для ее автоматической обработки на ЭВМ.

Если сбор информации ведется специально выделенным для этой цепи обслуживающим персоналом или представителями службы (группы) надежности, контроль и запись данных об условиях работы, последствиях отказов про-

изводится представителями этой службы. Остальная документация ведется обслуживающим персоналом.

3.8.2 Планирование испытаний и обработка экспериментальных данных

В соответствии с требованиями ГОСТ 27.002-83 планирование испытаний предусматривает ряд предварительных условий, обеспечивающих эффективность испытаний. Вводятся условные обозначения различных планов в виде совокупности трех символов, первый из которых указывает число испытываемых объектов (устройств) N, второй - наличие (R) или отсутствие (U) замены (восстановления) объектов, отказавших во время испытаний, третий - длительность испытаний (r) или (r) Таким образом, для испытаний (r) объектов без замены отказавших, имеем следующие три плана:

(N,U,r) - испытания до r -го отказа, r ≤ N;

(N,U,T) - испытания длительностью T;

[N,U,(r,T)] - испытание длительностью, равной $\min(t_r$ или T), где t_r - момент г-го отказа, а T - заведомо заданное время, или км пробега, или число циклов и т.д.

Аналогично вводятся обозначения для планов с заменой (восстановлением) отказавших устройств: (N,R,r); (N,R,T); [N,R,(r,T)]. В плане (N,R,r) в отличие от (N,U,r) число r может быть больше, чем N (где, в частности, допустимо N=1). Здесь приведено 6 наиболее распространенных типов испытаний. ГОСТ 27.001-83 предусматривает 16 планов испытаний, где учтены кроме названных условий, и такие, как M - восстановление объектов при испытаниях в случае их отказов; S - решение об окончании испытаний (о приемке или браковке) восстанавливаемых объектов (основывается на суммарном времени испытаний).

Результаты статистической обработки испытаний существенно зависят от вероятностных моделей, то есть от априорных (теоретических) распределений интервалов безотказной работы и восстановлений. Эти результаты могут приводить к заведомо ошибочным выводам, если модель не отражает реальные процессы возникновения отказов и механизмы восстановления, поэтому до решения основных задач апостериорного (на основе опыта) анализа надежности целесообразно сначала проверить, с помощью статистического критерия согласия, на соответствие выбранного априорного распределения эмпирическому распределению, построенному на основании данных проведенных испытаний.

Исходными данными (случайными величинами), которые подвергаются обработке, являются время наработки на отказ, время наработки на восстановление и число отказов однотипных элементов. После того, как такой материал собран, его обработка позволяет установить законы распределения показателей надежности: вероятность безотказной работы, интенсивность отказов, среднее время наработки на отказ и др.

Знание законов распределения дает возможность определить все остальные количественные показатели надежности. Таким образом, основная задача статистической обработки состоит в определении одного из законов распределения исходных случайных величин. В ряде случаев вид закона распределения известен заранее, до опыта. Например, как уже отмечалось выше, для электронной аппаратуры средств автоматики и релейной защиты справедлив экспоненциальный закон распределения показателей надежности. Это подтверждается многочисленными опытными данными, полученными в условиях эксплуатации.

При определении или подтверждении закона распределения целесообразен следующий порядок: подготовка опытных данных; построение гистограмм оцениваемого количественного показателя надежности; аппроксимация гистограмм теоретическим законом распределения и определение его параметров; проверка допустимости предполагаемого закона распределения на основе использования критериев согласия. Наиболее часто используется критерий χ^2 или критерий Колмогорова. Для получения достаточно точных результатов число наблюдений случайной величины (отказов) должно быть не менее 40-50.

По результатам полученных в процессе эксплуатации данных составляются таблицы, аналогичные таблице 3.

Таблица 3 — Экспериментальные данные для построения гистограмм законов распределения

конов распределения				
№ наблюдения	1	2	i	k
t_i , uac				
$n(t_i)$, um .				
$\hat{Q}(t_i) = \frac{n(t_i)}{N_0}$				
$D \cdot t_i$, vac				
$n(\Delta t_i)$				
$\hat{f}(t_i) = \frac{n(\Delta t_i)}{N_0 \cdot \Delta t_i}, 1/uac$				
$\hat{f}(t_i) = \frac{n(\Delta t_i)}{N_0 \cdot \Delta t_i}, 1/uac$ $\hat{\lambda}(t) = \frac{n(\Delta t_i)}{N_{cpi} \cdot \Delta t_i}, 1/uac$				

Примечание: $t_1,t_2...t_i$ - интервалы времени от начала эксперимента (t=0) до соответствующего момента; $n(t_i)$ - число отказов, зафиксированных за соответствующее время, начиная с начала эксперимента; Δt_i - отрезок времени, например $\Delta t_1 = t_2 - t_1$; $\Delta t_i = t_{i+1} - t_i$ (как правило $\Delta t_1 = \Delta t_2 = ... = \Delta t_i$, то есть $\Delta t_i = const$); $n(\Delta t_i)$ - число отказов, зафиксированных на заданном отрезке времени Δt_i ; N_0 - число однотипных образцов, поставленных на испытания; N_{cpi} - среднее число образцов, работоспособных на соответствующем отрезке

 Δt_i ; $\hat{Q}(t_i)$, $\hat{f}(t_i)$, $\hat{\lambda}(t_i)$ - соответственно оценки вероятности отказа, плотности распределения отказов и интенсивности отказов. По данным табл. 3 строятся гистограммы искомого показателя надежности, затем гистограммы аппроксимируются. По виду аппроксимации анализируемой кривой можно ориентировочно установить закон распределения времени отказов. Для экспоненциального закона наиболее показателен график $\lambda(t)$. Если анализируемая зависимость окажется $\lambda = const$ (см. рис. 34), то это экспоненциальный закон.

Согласно критерию Колмогорова, экспериментальное распределение случайной величины согласуется с выбранным теоретическим распределением, если выполняется условие $D\sqrt{n} \le 1$, в котором D наибольшее отклонение теоретической кривой функции распределения времени до отказа от экспериментальной, а n - число отказов. Пример аппроксимации гистограммы $\hat{Q}(t)$, полученной в результате обработки статистической кривой, представлен на рисунке 35.

Для построения теоретической кривой 2 значение λ определяется из графика $\hat{\lambda}(t)$, построенного по экспериментальным данным из таблицы 3. Подобный график изображен на рисунке 15. Линейная часть графика, идущая параллельно оси времени, отвечает экспоненциальной модели, то есть $\lambda = const$.

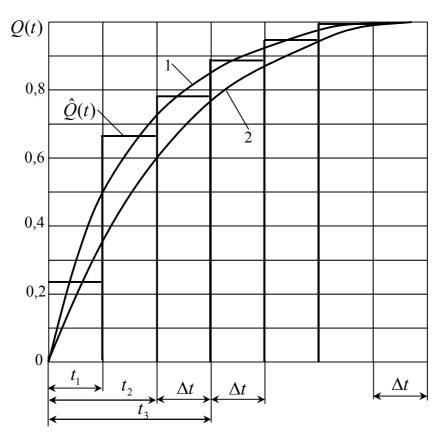


Рисунок 35 — К определению сходимости теоретического и эксперементального распределений: 1 — линеаризованная кривая функции $\hat{Q}(t)$ при $\lambda = const$ ($Q(t) = 1 - e^{-\lambda t}$); 2 — теоретическая кривая функции $\hat{Q}(t)$

Наибольшее отклонение D определяется между кривыми 1 и 2. Количество зафиксированных отказов n за время наблюдений определяется по формуле $n = \sum_{i=1}^{n} n(\Delta t_i)$. С целью избежания ошибок при построении графиков на рисунке 35, их необходимо строить на специальной бумаге с мелкой миллиметровой сеткой в соответствующем масштабе. Величина параметра D определяется простой разностью значений кривых 1 и 2 в зоне их наибольшего расхождения. Если $D\sqrt{n} < 1$, то можно считать, что значение $\lambda = const$, полученное из опытных данных, есть искомый параметр экспоненциального распределения. Вероятность безотказной работы анализируемого типа элементов соответственно определяется формулой $P(t) = e^{-\lambda t}$, а средняя наработка до отказа — формулой $T_1=\frac{1}{\lambda}$.

3.8.3 Интервальная оценка показателей надежности

Количество статистических данных для оценки надежности, полученных в процессе эксплуатации, принципиально ограничено. Полученные по ограниченному объему информации точечные оценки могут оказаться весьма приближенными. Причем отклонения этих оценок от истинного значения оцениваемого параметра являются величинами случайными. Очевидно, что с увеличением числа наблюдений (отказов) случайная ошибка оценки показателей уменьшается. На основе опытных данных используется специальная методика оценки показателей надежности в определенном интервале возможных их значений. Предположим, что истинное значение средней наработки до отказа составляет T_0 , а средняя наработка до отказа определена по полученным отказам:

$$\hat{T} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} t_i ,$$

где n - количество отказов за время испытаний; t_i - наработка до i -го отказа.

Чем меньше n тем больше расхождение между T_0 и \hat{T} , то есть существует интервал расхождения. Найти точные границы, в пределах которых находится истинное значение искомой величины, не представляется возможным. Однако можно определить интервал ее возможных значений с некоторой доверительной вероятностью $P_{_{\mathcal{I}}}=\beta$. При этом, чем больше доверительная вероятность β , тем шире границы интервала и наоборот. В общем виде эта зависимость имеет запись

$$\beta = P(T, \le T_0 \le T_{0/00}) \tag{91}$$

где T_H и T_B - соответственно нижняя и верхняя границы средней наработки до отказа, где лежат \hat{T} и T_0 .

Вероятность того, что значение T_0 выйдет за заданный интервал называется уровнем значимости:

$$\alpha = P(T, > T_0 > T_{0/00}) = 1 - \beta$$
 (92)

Значения доверительных вероятностей b обычно принимают равными 0,9; 0,95; 0,99. Соответствующие им уровни значимости составят 0,1; 0,05; 0,01. Доверительная вероятность β , определяемая выражением (91), характеризует степень достоверности результатов двусторонней (то есть с определением верхней и нижней границ) оценки.

Доверительный интервал для средней наработки до отказа при равных вероятностях $\frac{\alpha}{2}$ выхода за правую (верхнюю) и левую (нижнюю) границы для экспоненциального распределения определяется по выражению:

экспоненциального распределения определяется по выражению:
$$T_{H} = \frac{2T\sum r}{\chi_{\frac{\alpha}{2};2r}^{2}} < \hat{T} < \frac{2T\sum r}{\chi_{\frac{1-\alpha}{2};2r}^{2}} = T_{e} \tag{93}$$

где $\chi^2_{\frac{\alpha}{2};2r}$ и $\chi^2_{\frac{1-\alpha}{2};2r}$ - значения χ^2 (хи-квадрат) при параметрах $\frac{\alpha}{2}$ и $1-\frac{\alpha}{2}$;

2r = k - число степеней свободы, для вероятностей $P = \frac{\alpha}{2}$ и $P = 1 - \frac{\alpha}{2}$ соответственно.

Когда вычисляется только нижняя граница, то

$$\hat{T} > \frac{2T \cdot \sum r}{x^2_{\alpha, 2r}} \tag{94}$$

В выражениях (93) и (94) $T\sum r$ - суммарная наработка до отказа по отказам, зафиксированным во время эксперимента. Значения $\chi^2_{\frac{\alpha}{2};2r}$, $\chi^2_{\frac{1-\alpha}{2};2r}$ определяются по таблице П-1 квантилей распределения χ^2 (хи-квадрат).

Таким образом, для заданных уровней значимости а и числа степеней свободы k по таблице (см. прил. 1) находят соответствующие значения χ^2 , подставляют в выражение (93) и находят $T_{\scriptscriptstyle H}$ и $T_{\scriptscriptstyle B}$. Величина а задается в зависимости от требований, предъявляемых к анализируемой системе. Как известно, для экспоненциального закона $P(t) = e^{-\lambda t}$ и $T_0 = \frac{1}{\lambda}$ и выражения оценки надежности верхнего и нижнего значений вероятности безотказной работы имеют вид:

$$P_H(t) = e^{-\lambda_H \cdot t} = e^{-\frac{1}{T_H} \cdot t}$$
, где $T_H = \frac{2T \sum r}{\chi_{\frac{\alpha}{2};2r}^2}$ (95)

$$P_B(t) = e^{-\lambda_H \cdot t} = e^{-\frac{1}{T_B} \cdot t}$$
, где $T_B = \frac{2T \sum r}{\chi^2_{\frac{1-\alpha}{2};2r}}$ (96)

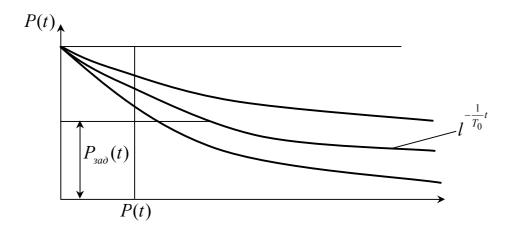


Рисунок $36 - \Gamma$ рафик зависимости P(t) для верхней и нижней границ средней наработки до отказа

Из рисунка 36 видно, что по практическим соображениям более важно определить $P_H(t)$. Если значение $P_H(t)$ удовлетворяет заданному уровню надежности $P_{\rm sad}(t)$ на интервале времени от 0 до t, то истинное значение:

$$P(t) = e^{-\frac{1}{T_0} \cdot t} > P_H(t) > P_{3ao}(t).$$

Это говорит о запасе надежности анализируемого устройства на интервале времени от 0 до t .

Для определения T_H и $T_{\mathbf{B}}$ по выражениям (95) и (96) необходима суммарная наработка $T\sum r$. В таблице 4 приведены формулы вычислений суммарной наработки для наиболее распространенных планов проведения испытаний.

Таблица 4 — Определение суммарной наработки для соответствующих планов испытаний

испытании					
План испытаний	Суммарная наработка $T{\sum} r$, ч				
(NU_r)	$T\sum_{j=1}^{r} r = \sum_{j=1}^{r} t_j + (N-r) \cdot t_r$				
(NUT)	$T\sum_{j=1}^{r} r = \sum_{j=1}^{r} t_j + (N-r) \cdot T$				
NU(r,T)	при $t_r < T$ $T \sum r = \sum_{j=1}^r t_j + (N-r) \cdot t_r$				
	при $t_r \ge T$ $T \sum r = \sum_{j=1}^r t_j + (N-r) \cdot T$				
(NR_r)	$T\sum r = N \cdot t_r$				
(NRT)	$T\sum r = N \cdot T$				
NR(r,T)	при $t_r \le T$ $T \sum r = N \cdot t_r$				
	при $t_r \ge T$ $T \sum r = N \cdot T$				

Примечание: t_r - момент (время) r-го (последнего отказа), r - количество отказов; t_j - время j -го отказа, $1 \le j \le r$.

Рассмотрим пример оценки T_H .

Пример

В результате наблюдений за эксплуатацией неремонтируемых однотипных устройств зафиксированы 12 отказов. После двенадцатого отказа наблюдения прекращаются. Значения наработки до отказа (в часах): 58, 110, 117, 198, 387, 570, 610, 720, 798, 820, 840, 921.

Оценить среднюю наработку до отказа заданного типа устройства, предполагая экспоненциальный закон распределения времени наработки до отказа.

Решение:

Из условия задачи следует, что наблюдения организованы по плану (N,U,r); N=100, $t_r=921\,uac$. В таблице 4 по указанному плану находим сум-

марную наработку всех устройств: $T\sum r = \sum_{j=1}^{r} t_j + (N-r) \cdot t_r$;

$$T\sum_{j=i} r = \sum_{j=i}^{12} t_j + (100 - 12) \cdot t_{12}$$

$$T\sum_{j=i} r = (58 + 110 + 117 + 198 + 387 + 570 + 610 + 720 + 798 + 820 + 840 + 921) + (100 - 12) \cdot 921 = 87197$$

Точечная оценка средней наработки до отказа $\hat{T} = \frac{T\sum r}{r} = \frac{87197}{12}7265 \ vac$.

Зададимся доверительной вероятностью $\beta=0,9$, тогда $\alpha=0,1$. Ограничимся односторонней оценкой $(T_{_H})$. Нижнюю доверительную границу $T_{_H}$ при $\alpha=0,1$ определим по выражению (93) и по прил. 1:

$$T_H > \frac{2T\sum r}{\chi^2_{\alpha=0.1:2r}} = \frac{2 \cdot 87197}{35.2} \approx 4950 \text{ } vac$$

Можно с 90%-й уверенностью утверждать, что истинное значение средней наработки до отказа не ниже 4950 час, и по этой оценке можно определять и другие показатели надежности, например, $\lambda_B = \frac{1}{T_H}$.

В данном пособии рассмотрен вопрос интервальной оценки параметров экспоненциального распределения. В специальной литературе приведены примеры интервальной оценки для более сложных законов распределения.

4. МЕТОДЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

4.1 Методологические основы технического диагностирования

Одной из наиболее важных характеристик САУ является восстанавливаемость. Контроль работоспособности системы и поиск дефекта, составляющие подчас до 90 % времени, затрачиваемого на восстановление системы, имеют в этом случае определяющее значение.

Дальнейшее развитие и усовершенствование САУ приводит к противоречиям. С одной стороны, требования к надежности систем повышаются, с другой - их усложнение приводит, как правило, к снижению надежности. Так как конструктивные, схемные и технологические возможности повышения надежности САУ ограниченны, то очевидным путем устранения этих противоречий является разработка методов и средств контроля работоспособности и поиска дефекта, т. е. решение задач, присущих технической диагностике.

Как известно, **техническая диагностика** направлена на исследование текущего состояния объектов диагностирования и форм его проявления во времени, на разработку методов его определения и принципов построения систем диагностирования.

Технические средства, используемые на различных объектах диагностирования, весьма разнообразны. Поэтому диагностирование должно учитывать различие в формах проявления технического состояния САУ, целесообразность использования тех или иных методов определения работоспособности и поиска неисправности и особенности технической реализации средств диагностирования.

Условия непрерывной эксплуатации систем различного назначения в отрыве от ремонтной базы при ограниченном времени их восстановления и минимальном ЗИПе заставляют ориентироваться не только, а подчас и не столько на обнаружение места возникновения дефекта, сколько на определение его характера, возможных последствий.

Так как рассматриваемыми **объектами диагностирования** (ОД) являются САУ, то задачи технического диагностирования имеют непосредственную связь с задачами теории управления и с методами, используемыми для их описания и анализа, что и определяет специфику исследований САУ как объекта технического диагностирования.

Техническое диагностирование предполагает определение технического состояния ОД с определенной точностью. Причем результатом этого процесса должно быть заключение о техническом состоянии объекта с указанием места, а при необходимости, вида и причины дефекта.

Поскольку необходимо классифицировать исправное (отсутствие дефектов) и неисправное (наличие дефектов) состояние ОД, то возникают задачи формирования математических моделей ОД анализа влияния дефектов на работоспособность ОД по тому или иному критерию. Результат такого анализа позволяет определить наиболее рациональный алгоритм поиска неисправности и

направление проектирования систем диагностирования. Организация диагностирования может быть представлена схемой, приведенной на рис. 37.



Рисунок 37 – Организация технического диагностирования САУ

В процессе функционирования система переходит из одного состояния в другое. В связи с тем, что исходным является исправное состояние и оно определено, наиболее существенным следует считать определение оператора перехода системы в те или иные состояния. Математическая формулировка оператора может быть различной в зависимости от природы рассматриваемой системы, ее структуры, характера упрощающих предположений и др. При всех обстоятельствах любое состояние системы должно определяться этим оператором однозначно, в этом состоит его детерминированность.

Ограниченность достоверности знаний закономерности переходов системы приводит в ряде случаев к необходимости использования вероятностных характеристик.

Переход системы в различные состояния происходит под влиянием возникшей неисправности. При контроле работоспособности результат перехода системы в то или иное новое состояние известен, хотя не всегда могут быть достоверно определены причины этого перехода. Когда причины неизвестны, возможно установить некоторую регулярную взаимосвязанную цепь событий, которая с определенной достоверностью, зависящей от числа и качества наблюдений, устанавливают указанную закономерность.

Особенностью детерминированных моделей является единственность траекторий, определяющих однозначно связь работоспособности САУ с характером ее неисправности.

Для случайных моделей оператор перехода учитывает вероятностные характеристики. Оператор здесь также имеет детерминированный характер, хотя он и не определяет достоверно траектории перехода системы из одного состояния в другое.

Состояние ОД в общем случае может быть описано n-мерным вектором

$$X = \begin{vmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dots \\ x_n \end{vmatrix}$$
 (97)

в котором $x_1, x_2, ..., x_n$ - составляющие вектора.

Оператор перехода системы из состояния в состояние может |быть описан матрицей вида

$$A = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{vmatrix}$$
(98)

где $a_{ij}(i, j = \overline{1, n})$ - коэффициенты преобразования.

Модель дает возможность представить любые процессы в форме линейных и нелинейных преобразований. Например, если вектор X характеризует исходное состояние системы, то ее производное состояние для линейного преобразования вида

$$x_i = \sum_{j=1}^{n} a_j x_j$$
, $(i = \overline{1, n})$ (98)

может быть записано в виде

$$X = AX \tag{99}$$

Для широкого класса систем, описываемых дифференциальными уравнениями, математическая модель принимает форму

$$\frac{dX}{dt} = A(t)X + F(t); \quad X(0) = C \tag{100}$$
 где $F(t) = \begin{vmatrix} f_1(t) \\ f_2(t) \\ \dots \\ f_n(t) \end{vmatrix}$ и $C = \begin{vmatrix} c_1 \\ c_2 \\ \dots \\ c_n \end{vmatrix}$

- n-мерные векторы; $f_i(t)$ и $c_i(i=\overline{1,n})$ - их составляющие.

Вероятностная математическая модель ОД также может быть представлена в векторной форме. Оператор перехода в выражениях (99) и (100) является при этом матрицей случайных величин.

Принятые принципы представления математических моделей не противоречат методам получения рациональных программ определения работоспособности и поиска дефекта, широко представленным в различных публикациях. В основе этих методов лежит представление оператора перехода в виде таблицы состояний, характеризуемых символами 0 и 1. Использование указанного подхода построения математической модели позволяет задать данные состояния, связав их с физически возможными, а следовательно, и правомерными для той или иной системы.

Анализ математической модели ОД должен быть направлен на решение двух основных задач: получение качественной и количественной оценок влияния возможных неисправностей на целевую функцию, характеризующую работоспособность ОД, и определение необходимого и достаточного числа контролируемых параметров.

При анализе математических моделей существует две тенденции. Первая из них состоит в том, что в рассмотрение вводится максимально возможное число состояний, в конечном счете определяемое числом элементов САУ. Вторая исходит из того, что второстепенные признаки нецелесообразно принимать во внимание в силу их незначительной информативности.

В случае использования детерминированного оператора (98) работоспособность ОД рассматривается в предположении определенного характера изменения параметров САУ.

При учете случайных законов изменения параметров работоспособность оценивается с помощью вероятностных характеристик. Подобное представление модели ОД не противоречит принципам, которые положены в основу построения алгоритмов определения работоспособности САУ и поиска дефекта при представлении процедур диагностики марковскими процессами, поскольку будущее состояние системы действительно может определяться предыдущим

состоянием. В любом случае существует вероятность того, что система, находящаяся в состоянии j в момент времени t, перейдет в состояние i в момент времени $t+\Delta t$. Если рассматривать дискретный марковский процесс и характеризовать поведение системы n-мерным вектором с составляющими P_{ij} , определяющими вероятность нахождения системы в момент времени t в состоянии j, то поведение системы в момент времени t+1 может быть найдено из решения системы уравнений вида

$$x_i(t+1) = \sum_{i=1}^n P_{i,j} x_j(t), (j = \overline{1, n})$$
 (101)

Направленность на ограничение числа состояний системы вполне оправданна, поскольку учет всех возможных связей, особенно для сложной системы, может создать непреодолимые трудности при разработке модели ОД. Кроме того, степень сложности модели может оказаться слишком высокой и за множеством второстепенных связей могут потеряться основные связи, определяющие процесс функционирования.

Разумное упрощение модели ОД может быть выполнено только при анализе специфики ОД и учете ограничений, диктуемых задачами диагностирования.

Объективной мерой ограничений служит время, отводимое на восстановление системы, и **цена отказа** системы. Эти параметры взаимосвязаны и образуют единый критерий, характеризующий эффективность решения задачи или степень возможных последствий, вызванных отказом системы.

4.2 Методы организации поиска отказавших элементов при основном соединении элементов

Основной задачей рациональной организации поиска дефекта является сокращение времени и средств, затрачиваемых на поиск. Это возможно лишь при использовании наиболее совершенных программ поиска дефекта.

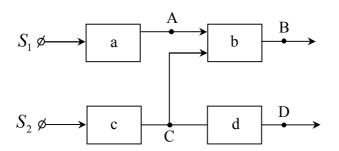


Рисунок - 38. Структурная схема объекта диагностирования

Практическая реализация теста состоит в подаче на вход (входы) элементов ОД воздействий, имитирующих рабочие сигналы, и контроле реакций на эти сигналы. При этом система выводится из эксплуатации. Предполагается, что исправному состоянию элемента (узла, блока) соответствует наличие сигнала 1 на его выходе, неисправному 0 - его отсутствие. При таком способе по-

иска, как правило, предполагается: известны контролируемые параметры (элементы) и формы проявления отказов; отказ одного из элементов влечет за собой потерю работоспособности ОД; известны экономические характеристики, сопровождающие поиск; подавляющая часть ОД допускает контроль с помощью введения в них контролирующего сигнала.

Среди множества критериев, следует выделить две группы: критерии информационные и экономические. Физическая интерпретация экономических критериев довольно разнообразна: стоимость проверки или проверочного оборудования, время поиска, число контролируемых элементов, средние потери на решение задачи и т. п.

При использовании тестов стремятся к получению минимального числа тестовых воздействий, при которых может быть обнаружен дефект любого из элементов системы, т. е. наименьшего числа проверок (тестов). Нахождению тестов для той или иной системы предшествует анализ ее функциональной модели, графическое изображение схемы объекта и построение таблицы неисправностей.

Таблица 5.

Проверки П	Состояние объекта Е							
	1111	0111	1011	1101	1110			
Π_{A}	1	0	1	1	1			
Π_{B}	1	0	0	0	1			
Π_{C}	1	1	1	0	1			
Π_{D}	1	1	1	0	0			

Простейшая схема ОД представлена на рис. 38, на котором обозначены: а, b, c, d - элементы объекта с соответствующими связями; S_1 и S_2 - входы; B и D - выходы. Таблица неисправностей этой схемы может быть представлена в виде табл. 5, в которой Π обозначает множество всех возможных проверок, а E — множество возможных состояний.

Из таблицы следует, что пять возможных состояний ОД, определяемых состоянием элементов, оказываются полностью различимыми с помощью четырех проверок. Отказавшие элементы определяются соответственно кодовыми числами 0011, 1011, 1000, 1110.

С ростом числа элементов увеличивается число состояний ОД, а следовательно, и сложность получения оптимальной программы (минимального теста). Минимизация программ может осуществляться известными в теории булевой алгебры методами. Методика оптимизации изложена в и других источниках.

Рассмотренный способ построения и оптимизации программ поиска дефекта особенно эффективен при диагностировании объектов дискретных систем.

Предположение о равнозначности отказов, что эквивалентно предположению об основной, или последовательной, схеме соединений, дает возможность использовать и другие методы построения квазиоптимальных программ

поиска дефекта. К таким программам относятся программы, полученные по методу половинного разбиения.

Рассмотрим особенности этого метода.

Для системы из N последовательно соединенных элементов введем параметры оценки программ поиска дефекта: τ_i - среднее время проверки i -го элемента; q_i - вероятность отказа системы из-за отказа i -го элемента.

Величина q_i определяется как вероятность отказа системы при отказе i го элемента

$$q_i = \frac{1 - p_i(t)}{1 - p_c(t)} = \frac{1 - e^{-\lambda_i t}}{1 - e^{-\lambda_c t}}$$
(102)

где $p_i(t)$ - вероятность безотказной работы i -го элемента;

 $p_c(t)$ - вероятность безотказной работы системы;

 λ_i - интенсивность отказов i -го элемента;

 λ_c - интенсивность отказов системы.

При малых значениях λt выражение (102) приближенно может быть представлено в виде

$$q_i \approx \frac{1 - (1 - \lambda_i t)}{1 - (1 - \lambda_i t)} = \frac{\lambda_i}{\lambda_i}$$
 (103)

ИЛИ

$$q_i = \frac{\lambda_i}{\sum_{i=1}^{N} \lambda_i}$$
 (104)

так как

$$\lambda_c = \sum_{i=1}^{N} \lambda_i \tag{105}$$

Задача по поиску неисправного элемента состоит в нахождении такой последовательности проверок, при которой на поиск дефекта затрачивается минимум времени.

Рассмотрим методику построения программы поиска дефекта при одинаковых значениях q_i и τ_i ,. Разделим условно систему на две части, содержащих соответственно m и N-m элементов. Неисправный элемент с вероятностью

$$p_1 = \frac{m}{N}$$
 может находиться в цепочке из m элементов и с вероятностью

$$p_2 = \frac{(N-m)}{m}$$
 - в цепочке из $N-m$ элементов.

Математическое ожидание числа неисправных элементов левее и правее точки деления равно

$$M = mp_1 + (N - m)p_2 = \frac{m^2 + (N - m)^2}{N}$$
 (106)

Функция (106) имеет минимум, т. е. существует такое число m, при котором число неисправных элементов слева и справа от точки деления минималь-

но. Число m, при котором достигается минимум математического ожидания M, а следовательно, и минимум проверок системы, находится из выражения

$$\frac{dM}{dm} = \frac{1}{N} [2m - 2(N - m)] = 0$$
 (107)

в результате $m = \frac{N}{2}$.

Очевидно, что при этом $p_1 = 0.5$ и $p_2 = 0.5$, т. е. отказавший элемент с равной вероятностью может находиться как в левой, так и в правой части системы.

Таким образом, при сформулированных условиях, оптимальный порядок проведения проверок состоит в последовательном делении цепочки элементов пополам. Направление деления каждый раз определяется результатом, полученным в точке деления. При различных q_i и τ_i вероятность неисправности при проверке i-го элемента составит

$$u_i = \frac{\left(q_i/\tau_i\right)}{\sum_{i=1}^N \frac{q_i}{\tau_i}} \tag{108}$$

Для нахождений оптимальной программы поиска дефекта найдем минимум математического ожидания числа неисправных элементов левее и правее некоторой точки разбиения множества элементов на две части k=m. Математическое ожидание в этом случае равно

$$M = m \sum_{i=1}^{m} u_i + (N - m) \sum_{i=m+1}^{N} u_i$$

ИЛИ

$$M = mp_m + (N - m)p_{N - m}$$

где $p_m = \sum_{i=1}^m u_i$ - вероятность нахождения неисправных элементов левее точки m :

 $p_{N-m} = \sum_{i=m+1}^{N} u_i$ - вероятность нахождения неисправных элементов правее точки m .

Эти вероятности составляют полную группу несовместимых событий

$$p_m + p_{N-m} = 1 (109)$$

Минимум будет иметь место при

$$\frac{dM}{dm} = \frac{d}{dm} \left[mp_m + (N - m)p_{N-1} \right]$$

В результате

$$p_m - p_{N-m} = 0 (110)$$

Решая совместно уравнения (14) и (15), найдем:

$$p_m - p_{N-m} = \frac{1}{2} \tag{111}$$

Оптимизация программы поиска дефекта состоит в том, что при первом шаге вся цепочка элементов разбивается на две части так, чтобы с вероятностью 0,5 неисправный элемент находился левее или правее некоторой контрольной точки т. В этой точке производится контроль состояния левой или правой цепочки элементов. Наличие или отсутствие сигнала определяет направление последующего деления на отрезки той или иной половины цепочки (с равными значениями вероятностей указанных отрезков цепи элементов). Дальнейшее развитие этой идеи нашло воплощение в разработке теории и практики метода функциональных проб. В основе его лежат положения теории графов, теории групп и комбинаторного анализа. Метод открывает одно из направлений функциональной диагностики с элементарными тестами и предполагает использование в качестве критерия поиска индекса предшествования, т. е. разбиение пространства состояний систем с учетом их структурных особенностей.

4.3 Принципы детерминированности в организации поиска дефекта

При создании новых совершенных автоматических систем и автоматизированных комплексов наиболее разумным следует считать решение, при котором учет задач диагностики осуществляется на стадии проектирования. Это обусловлено интересами повышения эффективности САУ, а также тем выигрышем, который достигается за счет использования результатов исследования качества проектируемых систем для нужд диагностики.

Для большинства проектируемых систем характеристики надежности имеют низкую достоверность даже в том случае, когда при проектировании используются элементы, значение показателей надежности которых известно. Последнее объясняется тем, что статистические данные, полученные при определенных режимах эксплуатации элементов и систем, не всегда или не в полной мере достоверны для других (отличных от указанных) режимов работы.

Наиболее объективными характеристиками, удовлетворяющими сформулированным выше задачам поиска дефекта, являются относительные веса контролируемых параметров. Весовые константы содержат объективную и объемную информацию относительно надежностных свойств и структурных особенностей САУ и ее составляющих.

С этой целью необходимо элементы САУ рассматривать с позиций их информационных свойств. Такая аналогия имеет известное допущение, тем не менее для широкого класса САУ она правомерна. В большей степени она применима к электромеханическим и к радиоэлектронным дискретным (цифровым) и непрерывным системам.

Взаимосвязь между энергией и информацией может быть выражена соотношением [30]

$$WJ_a = \frac{W_u}{\eta_{\mathfrak{I}}} \tag{112}$$

где W энергетический показатель качества элемента;

 $\eta_{_{9}}$ - энергетический коэффициент полезного действия элемента;

 $W_{_{U\!U}}$ - пороговое (предельное) значение энергии, характеризующее максимально возможную чувствительность элемента к повышению качества;

 J_a коэффициент, определяющий информационные свойства элемента.

Как показывает опыт эксплуатации, совершенствование качественных показателей САУ неминуемо (при постоянном значении η_3) влечет за собой снижение остальных. Одним из таких показателей и является показатель информационных свойств элемента. Этот показатель определяется вероятностными характеристиками, в частности, он может быть выражен через показатели надежности.

Это положение неплохо согласуется с данными полученными при проектировании и эксплуатации систем и устройств. Действительно, повышение качественных показателей (точности, быстродействия и пр.) и функциональное совершенствование элементов и устройств неминуемо приводит к увеличению числа деталей и усложнению связей между ними. Так, например, для измерительных устройств известно, что затрачиваемое число деталей N в среднем пропорционально показателю их качества т]. Взаимосвязь между этими показателями может быть охарактеризована выражением

$$N = k\eta \tag{113}$$

где k характеризует эффективность схем, в которых используются детали.

Усложнение элементов и устройств приводит к сокращению времени наработки до отказа T_{cp} . В самом деле, средняя интенсивность отказов устройства при m разновидностях деталей, входящих в него и имеющих интенсивность отказов λ_i , составит

$$\lambda_{cp} = \sum_{i=1}^{m} p_i \lambda_i \tag{114}$$

где p_i - процентное содержание каждой детали в устройстве.

Среднее время безотказной работы в этом случае определяется выражением

$$T_{cp} = \frac{1}{N\lambda_{cp}} \tag{115}$$

от которого после подстановки приходим к соотношению

$$\eta T_{cp} = \frac{\lambda}{k\lambda_{cp}} \tag{116}$$

Из (116) следует, что одновременное повышение надежности и качественных характеристик устройства может быть достигнуто лишь путем применения более надежных деталей (уменьшением λ_{cp}) и наиболее эффективных схем их использования (уменьшением N). Поскольку технологические возможности ограничены существующим уровнем науки и производства, повышение качества устройств сопровождается уменьшением их надежности.

Несмотря на ограниченность статистических данных, на основе которых строятся приведенные выше доказательства взаимосвязи качества и надежно-

сти, их можно считать в определенной степени справедливыми, тем более что такой подход, будучи использованный в практике исследования, проектирования и эксплуатации систем и устройств, находит все большее подтверждение.

Анализ САУ показывает, что для выполнения наиболее существенных функций в ней, как правило, требуются элементы и устройства с наиболее сложной структурой. Сложность, в свою очередь, непосредственно связана с относительным весом параметров, характеризующих устройства и элементы САУ. По мере уменьшения разнообразия соединений (схем) и деталей указанная зависимость приближается к линейной. Естественно, чем проще организована сложная структура, тем меньше приблизительность взаимосвязи относительного веса контролируемых параметров и показателей надежности устройств и элементов САУ.

Таким образом, учет относительного веса контролируемых параметров при построении программы поиска дефекта любых систем позволяет не только удовлетворить специфические требования диагностирования САУ (классификация характера неисправности, исключение возможных ее последствий, определение и реализация тактики переключений и пр.), но и является органически необходимым для систем с ограниченным числом отказов.

Относительный вес i -го контролируемого параметра может быть определен модулем его изменения

$$V_i(a_0) = \left| \frac{a_i}{a_{iv}} \right| \tag{117}$$

причем

$$V_i(a) = \left| \frac{a_i}{a_{iN}} \right|$$
 при $a_i < a_{iN}$

$$V_i(a) = \left| \frac{a_{iN}}{a_i} \right|$$
 при $a_i > a_{iN}$ (118)

где a_i - значение контролируемого i -го параметра;

 a_{iv} - начальное значение контролируемого i -го параметра;

 a_{iN} - номинальное значение контролируемого i -го параметра.

Наиболее объективной характеристикой работоспособности САУ является их точность. Показателями характера изменения работоспособности системы диагностирования служат весовые соотношения контролируемых параметров, определяющие степень влияния дефекта на работоспособность системы.

С другой стороны, необходимо, чтобы выбранный критерий отвечал и специфике процессов диагностирования, учитывающих вероятностный характер возникновения неисправностей, а в отдельных случаях и экономические издержки диагностирования (стоимость, ЗИП и т. д.).

Принимая в качестве определяющего параметра точность САУ и используя его в сочетании с вероятностными и экономическими характеристиками системы, можно решить задачу алгоритмизации поиска дефекта с наибольшей эффективностью.

В простейшем случае оптимизация программы поиска дефекта сводится к выбору последовательных решений по направлению поиска, максимизирующего критерия f(v), в качестве которого рассматриваются относительные веса каналов, трактов, блоков, элементов ОД.

В более общем случае задача поиска дефекта сводится к выделению из множества возможных программ программы $U^* \in U$, которая определит переход из множества начальных состояний (каналов) $S_0 \in \widetilde{S}_0$ во множество конечных состояний $S_{\kappa o H} \in \widetilde{S}_{\kappa o H}$ (элементов, параметров) так, чтобы критерий f(v) обращался в максимум.

Состояние объекта диагностирования S определяется вектором $V(v_1,v_2,...)$, фазовыми переменными которого (компонентами) в момент поиска являются контролируемые параметры, характеризуемые их относительным весом. На каждой стадии и-этапного процесса поиска выбранное (из числа возможных) решение позволяет рассматривать новое состояние системы, характеризуемое вектором $V \leq g(v,u)$. Причем такой переход сопровождается приростом критерия f(v,u), зависящим как от прежнего состояния системы S, так и от принятого решения на каждом из шагов (u). Выбор на каждом этапе поиска дефекта осуществляется из конечного числа возможных решений, обусловленных структурой системы и заданными условиями диагностирования.

Конечной целью алгоритмизации процесса поиска дефекта является максимизация полного прироста критерия (за N этапов принимаемых решений) $F_1(v) = \max f(v,u)$, зависящего от начального состояния V и числа шагов (этапов) поиска. Используя принцип оптимальности, приходим к основному рекуррентному соотношению для детерминированной программы поиска:

$$F_{N}(v) = \max\{f(v, u) + F_{N-1}[g(v, u)]\}; (u = \overline{1, N})$$
 (119)

В ряде случаев необходима иная интерпретация функции f(v,u), когда эта функция может подвергаться нормализации по ряду физических параметров. Основными из них следует считать: относительное время проверки $t_0 = t'/t = \beta_1$; относительную стоимость проверки $c_0 = c'/c = \beta_2$, относительное число проверяемых параметров $r_0 = r'/r = \beta_0$. Здесь t,c,r - соответственно время проверки, ее стоимость для всех каналов, трактов (в канале), элементов (в блоке) и полное число трактов (в системе), блоков (в тракте), элементов (в блоке); t', c' - соответственно время проверки и ее стоимость для проверяемых трактов, блоков и элементов; r' - в общем случае число проверяемых каналов, трактов, блоков и элементов.

Нормализация осуществляется введением для f(v,u) множителя соответствующих относительных коэффициентов либо в отдельности, либо в комбинации.

Выражение (24) в этом случае принимает вид
$$F_{N}(v) = \max \left\{ f'(v, u) + F_{N-1}[g'(v, u)] \right\}$$
 где $f' = \beta_{1} f$; (120)

$$g' = \beta_i g; \ (i = \overline{1, t}) \tag{121}$$

Решение о необходимости нормализации принимается на основании соображений, продиктованных частными задачами диагностики и конструктивными особенностями системы и ее составляющих.

В случае использования одновременно q показателей качества оптимизации поиска дефекта осуществляется нахождением значения $\max F_{\scriptscriptstyle N} \in F_{\scriptscriptstyle N_i}$, причем

$$F_{Nj}(v) = \max\{f_j(v, u) + F_{N-1}[g_j(v, u)]\}; (j = \overline{1, q})$$
 (122)

Рекуррентные соотношения (121) и (122) позволяют использовать идею и принципы метода динамического программирования для детерминированных моделей поиска дефекта систем различной конструкции, сложности и назначения.

Оптимальная стратегия находится из условий максимизации функции F(v), состоящей в тесной взаимосвязи с последовательностью принимаемых (в направлении поиска) решений и и являющейся в конечном итоге функцией относительного веса контролируемого параметра. Для сложных систем такой подход особенно эффективен, поскольку поиск дефекта направлен прежде всего на восстановление системы за допустимое время. Сложная система представляется совокупностью взаимосвязанных элементов, обладающих различной значимостью. Различной в этом случае будет и значимость каждой проверки из множества возможных проверок. Таким образом, нахождение цепи элементов, отличающейся определенными характеристиками (в рассматриваемом случае максимальной значимостью), выходит за рамки обычных методов математического анализа и переходит в разряд задач, имеющих алгоритмическое решение.

Множество возможных проверок в этом случае отождествляется с множеством возможных дискретных состояний (S_i), в которые переводится система. Для каждого из возможных состояний существует множество управлений - проверок. Управление на каждом шаге зависит от состояния, в котором находится система в настоящий момент. Если ввести понятие функций переходов, то можно записать рекуррентное соотношение, определяющее поведение системы на каждом шаге:

$$S_{i+1} = g(s_i, u_i)$$
 (123)

Последовательному N -шаговому процессу поиска можно поставить в соответствие траекторию движения поиска при заданном исходном шаге

$$S = (s_0, s_1, ..., s_N)$$
 (124)

Качество выбранной проверки (управления) характеризуется численным значением целевой функции $F_{\scriptscriptstyle N}(s)$, зависящей от траектории поиска S .

Поскольку процесс поиска дефекта определяется состоянием системы, численной характеристикой которого является относительный вес контролируемого параметра v_i , и выбранным управлением (проверкой) на данном шаге u_i , то N-шаговый процесс поиска $V=(u_1,u_2,...,u_N)$ представляется траекторией его движения

$$V = (v_1, v_2, ..., v_N)$$
 (125)

Задача определения наиболее «весомой» цепи элементов из всех возможных цепей состоит в выборе управления, доставляющего максимум выбранному критерию $F_N(v)$. При аддитивности критерия относительно множества состояний, рассматриваемых в процессе проверок, значение этого критерия будет

$$F_N |v| = \sum_{i=1}^N f_i(v_i u_i)$$
 (126)

Пусть $F_1^*(v_{N-k+1})$ является функцией, равной численному значению критерия (126) при оптимальном k-шаговом процессе поиска дефекта, начиная из состояния, определяемого v_{N-k+1} . Предположим, что исходное положение последовательности поиска определяется v_N . Необходимо выбрать одношаговое управление проверками таким образом, чтобы максимизировать (126). Тогда

$$F_1^*(v_N) = \max \sum_{i=1}^N f_i(v_i, u_i) = \max f_N(v_N, u_N)$$
 (127)

В случае оптимального двухшагового управления проверкой при максимизации (126) получаем

$$F_2^*(v_{N-1}) = \max \left\{ f_{N-1}(v_{N-1}, u_{N-1}) + F_1^*[g(v_{N-1}, u_{N-1})] \right\}$$
(128)

Продолжая аналогичные рассуждения, для N -шагового управления можно получить выражение:

$$F_2^*(v_1) = \max\{f_1(v_1, u_1) + F_{N-1}^*[g(v_1, u_1)]\}$$
 (129)

Определение цепи проверок сводится к следующей вычислительной процедуре:

- 1) нахождение оптимального управления по отысканию цепи последовательного поиска дефекта с максимальным весовым коэффициентом начинается с последнего шага. Для каждой из возможных проверок $v_N \in \mathcal{V}$ с использованием
- (32) находится и запоминается оптимальное управление $u_N^* \in u$;
- 2) с помощью выражения (33) для каждой из возможных проверок определяется оптимальное двухшаговое управление $u_{\scriptscriptstyle N} \in u$;
- 3) определение оптимального многошагового управления процессом поиска дефекта при нахождении цепи последовательных проверок с максимальным суммарным весовым коэффициентом входящих в нее элементов осуществляется путем решения одношаговых оптимизационных задач с использованием метода динамического программирования.

В отличие от упомянутых ранее методов такой подход к алгоритмизации поиска дефекта позволяет минимизировать время поиска с одновременным исключением возможных экстремальных ситуаций в системах с высокой ценой отказа и обоснованно использовать временную информационную и функциональную избыточность, заложенные в объект диагностирования.

4.4 Оптимизация программ поиска дефекта с использованием критерия приведенной вероятности

Как было показано, при алгоритмизации процедур поиска дефекта начинают с формулировки обоснованных соображений по определению перечня возможных состояний ОД и набора необходимых проверок. Существующие методы определения элементарных и минимальных тестов диагностирования предполагают, что такой набор задан и все дефекты равновероятны. Для исследуемых САУ такой подход давал бы неоправданно грубое приближение. Учет весовых коэффициентов каналов, трактов, а в ряде случаев и блоков особенно важен и может быть выполнен при определении возможных состояний, приводящих к потере системой работоспособности.

В качестве критерия выбора может быть использован комбинированный детерминированно-вероятностный критерий вида

$$p^* = \frac{v(a_0)}{p} \cdot 10^{-1} \tag{130}$$

где $v(a_0)$ - относительный вес контролируемого параметра; p - вероятность дефекта модуля (канала, тракта, блока).

Назовем p^* приведенной вероятностью дефекта.

Определяющей в этом случае для перечня рассматриваемых состояний следует считать следующую последовательность:

- 1) нахождение модуля с максимальным относительным весом параметра v;
- 2) определение приведенной вероятности модуля p_1^* ;
- 3) выбор эквивалентных состояний из условия $p_1^* \approx p_2^* \approx ... \approx p_n^*$.

Формирование таблицы состояний по указанному принципу позволяет: оправданно включить в нее модули с различной вероятностью дефектов (что объективно необходимо) в перечень равновероятных состояний; обоснованно ограничить число рассматриваемых состояний, а следовательно, и проверок; учесть специфические требования диагностирования САУ; упростить расчеты по минимизации программ поиска дефекта.

Для подсистем и каналов сложных САУ может быть использован более совершенный критерий приведения, позволяющий учесть допустимые пределы изменений контролируемого параметра из условий аварийных и экстремальных ситуаций. Такой критерий имеет вид

$$p^* = \frac{v(a_0)Q^H}{p}$$
 (131)

где
$$Q^{H} = \sum_{i=1}^{k} r_{i} Q_{i}^{H}$$
;

 $Q^{\scriptscriptstyle H}\,$ - нормированное значение показателя качества модуля;

k - число показателей качества модуля;

 r_i - весовой коэффициент показателя качества.

Построение и анализ тестов могут быть выполнены с использованием методов, посвященных исследованию формализованных методов алгоритмизации процессов диагностирования. Несколько обособленными следует считать методы минимизации программ поиска дефекта, основанные на оценке количества информации. Несмотря на кажущуюся простоту задачи, определение оптимальной программы поиска дефекта для систем с неравновероятными дефектами элементов сложно.

Приведение показателей качества с помощью изложенного выше метода в ряде случаев позволяет существенно упростить задачу. Например, приведение к вероятностям, отвечающим условию

$$p_1^* \approx p_2^* \approx \dots \approx p_n^* = const \qquad (132)$$

в простейшем случае позволит использовать метод половинного разбиения, эффективный при проверке схем последовательно соединенных элементов САУ. Приведение оказывается эффективным и при построении тестов по максимуму информации в предположении неравновероятных дефектов.

4.5 Влияние периодичности диагностических циклов на показатели надежности восстанавливаемых систем

Структурное и конструктивное разнообразие САУ затрудняет создание единой унифицированной системы диагностирования, хотя требования по унификации остаются по-прежнему одними из основных. Такое положение приводит к необходимости анализа и учета принимаемой схемы построения САУ.

Для систем диагностирования любого типа характерны следующие режимы работы: режим работы с периодически повторяющимися диагностическими циклами; режим непрерывного контроля работоспособности и организации поиска дефекта.

При оценке методов повышения надежности систем и устройств в процессе эксплуатации с использованием методов и средств технического диагностирования решается задача качественного и количественного определения того выигрыша в надежности, который будет получен от системы диагностирования.

Наиболее объективной оценкой эффективности диагностирования является коэффициент готовности системы. Действительно, из выражения для коэффициента готовности следует, что уменьшение времени, затрачиваемого на восстановление системы, неизбежно приводит к росту коэффициента готовности. Как будет показано ниже, степень роста коэффициента готовности существенно зависит от принятой схемы взаимодействия система диагностирования средства диагностирования.

Рассмотрим методику оценки влияния проверок, проводимых в процессе диагностирования, на вероятность безотказной работы системы. Характер проверок может быть различным: это может быть и оценка работоспособности системы /и поиск дефектов, выполняемый одним из возможных способов (функциональное диагностирование, тестовое диагностирование).

При простейшем потоке отказов неисправность может возникнуть как в процессе эксплуатации, так и в периоды, в которые система находится в нерабочем состоянии. Для простейших потоков справедливо равенство

$$\lambda_1 t_1 = \lambda_2 t_2 \tag{133}$$

в котором произведение $\lambda_1 t_1$ характеризует рабочий период, $\lambda_2 t_2$ - нерабочий период системы диагностирования, причем, как показывает опыт эксплуатации, $\lambda_1/\lambda_2 > 1$. Для одного часа работы системы $(t_1 = 1)$, эквивалентного (в вероятностном смысле) λ_1/λ_2 часам ее нерабочего состояния, имеем

$$t_2 = \lambda_1 / \lambda_2 \tag{134}$$

Введем обозначения:

 t_i' - время нахождения системы в нерабочем состоянии перед i -м вводом в работу;

 t_{i} - время работы системы при i -м вводе в работу;

k - число включений системы (вводов в работу).

Общее время эксплуатации системы, может быть определено выражением

$$T_{oбij} = \sum_{i=1}^{k} t_i + \sum_{i=1}^{k+1} t_i'$$
 (135)

или, учитывая (133)

$$T'_{o\delta u_i} = \sum_{i=1}^{k} t_i + \sum_{i=1}^{k+1} \frac{\lambda_2}{\lambda_1} t'_i$$
 (136)

Переход к выражению (41) позволяет считать систему условно работающей непрерывно в течение времени $T'_{oбщ}$ при условии ее эксплуатации в промежутке времени t_i . При исходной схеме работы, используя приведенные в [16] аналитические преобразования, можно получить выражения для вероятности $F_i(t,jT)$ того, что i-й элемент вызовет отказ системы в интервале времени продолжительностью

$$F_{i}(t, jT) = 1 - e^{\frac{-t}{\bar{t}_{i}}} - \left[(1 - p_{i}) \cdot \frac{Q_{i}}{e^{\frac{-t}{\bar{t}_{i}}}} - e^{\frac{-t}{\bar{Q}_{i}}} \right]$$
(137)

Интервал времени t отсчитывается от i-й проверки при времени эксплуатации системы jT. В выражении (42) Q_i - средний нерабочий период i-го элемента системы; t_i - среднее время безотказной работы i-го элемента.

Выражение для вероятности безотказной работы системы из N элементов при $t=kT+\tau$, в котором учтены все предыдущие k проверок (в общем случае $k\neq j$), имеет вид

$$P(t, jT) = P(kT + \tau, jT) = \prod_{i=1}^{N} \left\{ e^{\frac{-T}{\overline{t_i}}} + \left[(1 - p_i) \cdot \frac{Q_i}{\overline{t_i} - Q_i} \right] \cdot \left[e^{\frac{-T}{\overline{t_i}}} - e^{\frac{-T}{Q_i}} \right] \right\} \times \prod \left\{ e^{\frac{-\tau}{\overline{t_i}}} + (1 - p_i) \cdot \frac{Q_i}{t_i - Q_i} \cdot \left[e^{\frac{-\tau}{\overline{t_i}}} - e^{\frac{-\tau}{Q_i}} \right] \right\}$$

$$(138)$$

Поскольку число вводов системы в эксплуатацию (k) известно, то при принятой продолжительности интервалов времени (T), в конце которых выполняются операции диагностирования, может быть найдена вероятность отказов за время эксплуатации системы $tk+\tau$. Могут быть решены и другие задачи: найдено необходимое число проверок для заданного значения вероятности безотказной работы либо интервал времени между проверками при заданном их числе.

На рис. 39 приведен пример, иллюстрирующий изменение вероятности безотказной работы одной из систем с соотношением $\lambda_1/\lambda_2=20$ при различном значении интервалов времени T, т. е. при различном числе диагностических циклов. Анализ кривых, соответствующих непрерывному контролю (T=0), а также контролю с периодами в 15, 30 и 60 ч, позволяет сделать вывод об увеличении надежности при использовании системы диагностирования.

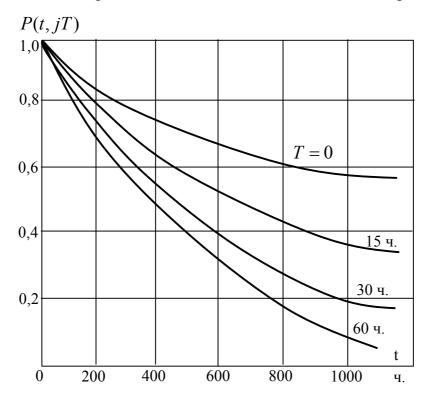


Рис. 39 - Зависимости вероятности безотказной работы системы от периодичности диагностирования

4.6. Основы методики учета влияния характеристик систем диагностирования на показатели надежности САУ

Характер и степень влияния используемых методов и средств диагностирования на повышение надежности САУ необходимо рассматривать с учетом выбираемой компоновки узлов и устройств системы диагностирования. Организация взаимодействия элементов системы диагностирования предполагает прежде всего изучение условий эксплуатации и использования объекта и аппаратуры диагностирования и определение множества состояний, в которых могут находиться элементы системы диагностирования. Это взаимодействие ха-

рактеризуется принятым способом оценки работоспособности, методом поиска дефектов, а также функциональными и конструктивными особенностями системы диагностирования.

Поскольку наибольший выигрыш в надежности в каждом конкретном случае имеет свой оптимум, то необходимо выбрать критерий, по которому осуществляется оптимизация. Таким критерием является коэффициент готовности, наиболее полно характеризующий надежность восстанавливаемых систем при использовании тех или иных методов и средств диагностирования.

Существует довольно много способов размещения аппаратуры диагностирования на объектах. Например: 1) полностью встроенная система диагностирования, при которой все элементы диагностирования (датчики, коммутирующие и оконечные устройства) размещены непосредственно в САУ; 2) полностью автономная система диагностирования, для которой, как следует из самого определения, характерна полная автономность всех узлов аппаратуры диагностирования (АД); 3) промежуточные, компромиссные варианты размещения аппаратуры диагностирования на объекте.

Рассмотрим методику оценки степени влияния различных схем взаимодействия элементов диагностирования, широко используемую в практике исследования и проектирования систем диагностирования. При этом ограничимся конкретными тремя вариантами а, б и в, приведенными на рис. 40. Схемы, построенные по вариантам а и б, являются полностью встроенными и полностью автономными системами.

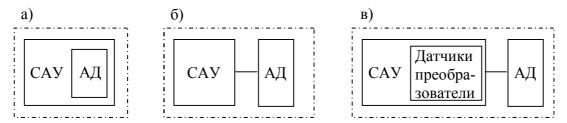


Рис. 40 - Варианты взаимодействия элементов системы диагностирования

Вариант в представляет собой схему, в которой основная часть средств диагностирования (коммутирующие устройства, устройства обработки информации и индикации) автономна, а датчики-преобразователи непосредственно находятся в системе диагностирования.

Для комплекса «САУ—средства технического диагностирования» могут рассматриваться следующие режимы: рабочий режим (Р); режим проверки объекта (Я); режим проверки системы диагностирования (ПСД).

В каждом из режимов рассмотрим следующие несовместные состояния, образующие полную группу событий:

 H_o - исправен комплекс;

 H_1 - неисправна САУ;

 H_2 - неисправна центральная часть системы диагностирования;

 H_3 - неисправны встроенные датчики-преобразователи.

Введем обозначения для интенсивностей переходов из одного состояния в другое:

- λ средняя интенсивность отказов САУ;
- λ_1 средняя интенсивность отказов центральной части системы диагностирования;
- λ_2 средняя интенсивность отказов встроенных датчиков-преобразователей;
- *v* средняя интенсивность контроля;
- η средняя интенсивность цикла диагностирования;
- ε средняя интенсивность цикла проверки системы диагностирования;
- μ средняя интенсивность восстановления неисправной САУ;
- $\mu_{\rm l}$ средняя интенсивность восстановления центральной части системы диагностирования;
- μ_2 средняя интенсивность восстановления датчиков-преобразователей.

Под интенсивностью перехода системы из состояния в состояние понимается условная плотность вероятности того, что этот переход произойдет в момент времени t, предшествовавший моменту времени нахождения системы в первом состоянии.

С учетом принятых обозначений модель, соответствующая вариантам а и б (рис. 40), может быть отображена графами, представленными на рис. 40 а, б, а модель, соответствующая варианту в, - графом на рис. 40, в.

По графам состояний составляется система дифференциальных уравнений, связывающих вероятности нахождения системы диагностирования в каждом из множества состояний, и находится коэффициент готовности САУ.

С помощью этих уравнений оказывается возможным в зависимости от характеристик процессов диагностирования и способа взаимодействия элементов системы диагностирования определить, насколько увеличивается коэффициент готовности САУ при использовании системы диагностирования.

Данный подход к оценке влияния процедур диагностирования на показатели надежности САУ позволяет также найти условия, при которых система диагностирования имеет максимальную эффективность.

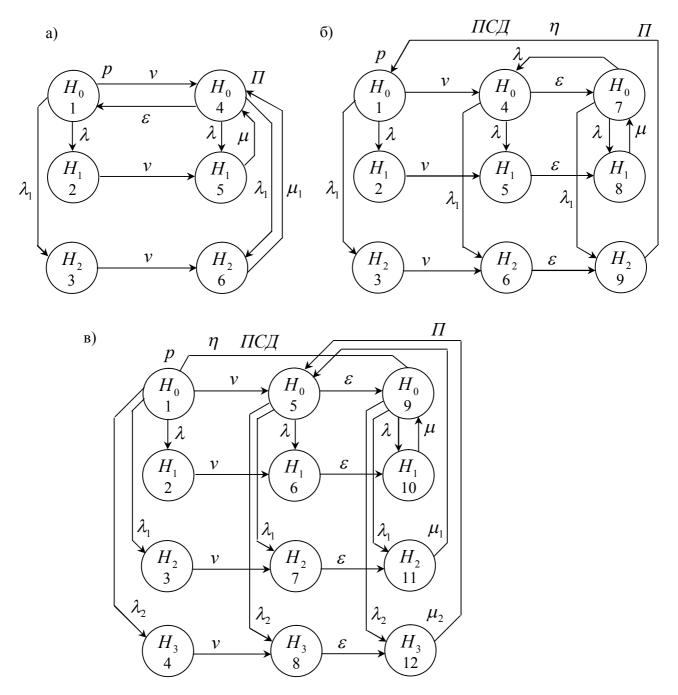


Рис. 41 - Графы возможных состояний системы диагностирования

5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- 1. Основные понятия теории надежности.
- 2. Основные показатели безотказности объектов.
- 3. Основные показатели надежности восстанавливаемых объектов.
- 4. Комплексные показатели надежности.
- 5. Математические модели, используемые в расчетах надежности.
- 6. Определение основных показателей надежности системы, состоящей из невостанавливаемых элементов.
- 7. Порядок решения задач надежности.

- 8. Способы резервирования и общее резервирование невосстанавливаемой системы с постоянно включенным резервом и целой кратностью.
- 9. Надежность системы с нагруженным резервом.
- 10. Общее резервирование замещением.
- 11. Надежность системы при раздельном резервировании и с целой кратностью по всем элементам.
- 12. Резервирование в мажоритарных системах.
- 13. Надежность восстанавливаемой одноэлементной системы.
- 14. Надежность нерезервированной системы с последовательно включенными восстанавливаемыми элементами.
- 15. Надежность восстанавливаемой дублированной системы.
- 16. Планирование испытаний и обработка экспериментальных данных по надежности элементов и систем.
- 17. Интервальная оценка показателей надежности.