

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
«Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»

Факультет компьютерного проектирования

Кафедра проектирования информационно-компьютерных систем

НАДЁЖНОСТЬ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ. ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

*Рекомендовано УМО по образованию в области
информатики и радиоэлектроники в качестве пособия
для специальности 1-39 03 01 «Электронные системы безопасности»*

Под редакцией С. М. Боровикова

Минск БГУИР 2015

УДК 621.396.6-027.45(076.5)
ББК 32.844-02я73
Н17

Рецензенты:
кафедра информационных технологий в управлении
Белорусского национального технического университета
(протокол №8 от 06.05.2014);

профессор кафедры радиоэлектроники учреждения образования
«Минский государственный высший радиотехнический колледж»,
доктор технических наук, профессор Ф. Д. Троян

Надёжность технических систем. Лабораторный практикум : посо-
Н17 бие / С. М. Боровиков [и др.]; под ред. С. М. Боровикова. – Минск :
БГУИР, 2015. – 72 с. : ил.
ISBN 978-985-543-105-4.

Пособие содержит описание шести лабораторных работ, в которых с помощью имитационного моделирования на ЭВМ работоспособности изделий определяются показатели надёжности электронных устройств и систем, выполняется оценка эффективности функционирования электронной системы безопасности, рассматривается применение на практике некоторых методов обеспечения надёжности электронных устройств.

УДК 621.396.6-027.45(076.5)
ББК 32.844-02я73

ISBN 978-985-543-105-4

© УО «Белорусский государственный
университет информатики
и радиоэлектроники», 2015

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	5
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1	
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЁЖНОСТИ РЭУ МОДЕЛИРОВАНИЕМ НА ЭВМ ОТКАЗОВ ЭЛЕМЕНТОВ	6
1.1. Цель работы	6
1.2. Теоретические сведения	6
1.3. Задания на экспериментальную часть лабораторной работы	10
1.4. Содержание отчёта	11
1.5. Контрольные вопросы	12
Литература	13
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2	
ПРОВЕРКА ПРАВИЛЬНОСТИ ВЫБОРА ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРОННОГО КАСКАДА ПО КОЭФФИЦИЕНТАМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ	14
2.1. Цель работы	14
2.2. Теоретические сведения	14
2.2.1. Коэффициенты электрической нагрузки элементов	14
2.2.2. Априорное ограничение нагрузки элементов РЭУ	15
2.3. Объект исследования. Особенности учебной программы для ЭВМ	18
2.4. Задания на экспериментальную часть лабораторной работы	21
2.5. Содержание отчёта	22
2.6. Контрольные вопросы	22
Литература	23
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3	
ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАДЁЖНОСТИ ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ МЕТОДОМ ПРЯМОГО ПЕРЕБОРА ЕЁ РАБОТОСПОСОБНЫХ СОСТОЯНИЙ	24
3.1. Цель работы	24
3.2. Теоретические сведения	24
3.3. Особенности учебной программы для ЭВМ	28
3.4. Задания на экспериментальную часть лабораторной работы	29
3.5. Содержание отчёта	30
3.6. Контрольные вопросы	30
Литература	31

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4	
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕРОЯТНОСТИ ЗАЩИТЫ ОБЪЕКТА	
МОДЕЛИРОВАНИЕМ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ И	
ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ УСТРОЙСТВ ЭСБ	32
4.1. Цель работы	32
4.2. Теоретические сведения	32
4.3. Описание исследуемой ЭСБ и методические указания по её анализу.....	35
4.4. Особенности учебной программы для ЭВМ	37
4.5. Задания на экспериментальную часть лабораторной работы	38
4.6. Содержание отчёта	39
4.7. Контрольные вопросы	40
Литература	40
 ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №5	
ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАДЁЖНОСТИ ЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМЫ	
БЕЗОПАСНОСТИ МЕТОДОМ ПОСТРОЕНИЯ ДЕРЕВА ОТКАЗОВ	41
5.1. Цель работы	41
5.2. Теоретические сведения	41
5.3. Особенности учебной программы для ЭВМ	48
5.4. Задания на экспериментальную часть лабораторной работы	49
5.5. Содержание отчёта	50
5.6. Контрольные вопросы	51
Литература	51
 ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №6	
ОТБОР ТРАНЗИСТОРОВ ПОВЫШЕННОГО УРОВНЯ НАДЁЖНОСТИ	
МЕТОДОМ ИНДИВИДУАЛЬНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ	52
6.1. Цель работы	52
6.2. Теоретические сведения	52
6.2.1. Индивидуальное прогнозирование надёжности элементов и РЭУ методом распознавания образов. Общие сведения	52
6.2.2. Прогнозирование методом пороговой логики	56
6.3. Методика проведения исследований	64
6.4. Особенность учебной программы для ЭВМ	68
6.5. Задания на экспериментальную часть лабораторной работы	68
6.6. Содержание отчёта	70
6.7. Контрольные вопросы	71
Литература	71
 ПРИЛОЖЕНИЕ. Справочные таблицы к лабораторной работе №1	
72	

ПРЕДИСЛОВИЕ

В соответствии с учебным планом специальности 1-39 03 01 «Электронные системы безопасности» практическая подготовка по дисциплине «Надёжность технических систем» (НТС) предусматривает 16 часов лабораторных и 16 часов практических занятий.

Предлагаемый лабораторный практикум включает шесть виртуальных лабораторных работ. Слово «виртуальные» подчёркивает то, что структура и состав электронной системы безопасности (ЭСБ) и её составных частей, надёжность элементов и устройств, эффективность функционирования ЭСБ моделируются в памяти ЭВМ. Практикум позволяет сформировать умения и развить навыки практической подготовки студентов по дисциплине НТС в соответствии с учебной программой дисциплины.

Виртуальные лабораторные работы разрабатывались кафедрой проектирования информационно-компьютерных систем (ПИКС) в рамках выполнения задания по молодёжному гранту на совершенствование учебного процесса по теме «Надёжность технических систем: лабораторный практикум с использованием виртуальных объектов и систем».

В разработке и отладке прикладного программного обеспечения виртуальных лабораторных работ (программ для ЭВМ) приняли участие аспиранты кафедры ПИКС Е. Н. Шнейдеров, И. А. Бурак, магистранты кафедры А. Е. Епихин, А. В. Мироненко, А. С. Гилимович, студенты Н. В. Сасковец (группа 902501), Д. А. Сташевский (группа 912601) и С. А. Полищук (группа 012601).

Авторы будут признательны за высказанные рекомендации и предложения по улучшению содержания и сценариев виртуальных лабораторных работ (e-mail: bsm@bsuir.by).

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЁЖНОСТИ РЭУ МОДЕЛИРОВАНИЕМ НА ЭВМ ОТКАЗОВ ЭЛЕМЕНТОВ

1.1. Цель работы

Определение показателей надёжности радиоэлектронных устройств (РЭУ) моделированием на ЭВМ отказов элементов.

1.2. Теоретические сведения

Продолжительность работы изделия (элемента, устройства и т. д.), выраженную в часах, циклах переключения или других единицах, в технике называют **наработкой**. В радиоэлектронике наработка элементов и устройств в большинстве случаев выражается в часах. Для некоторых элементов (переключатели, реле и др.) наработка может измеряться в циклах переключения.

В теории и практике надёжности часто интересуются **наработкой изделия до отказа**, в качестве которой рассматривается его суммарная наработка (без учёта перерывов) с момента начала эксплуатации до момента возникновения отказа. Если наработка есть время работы, то наработка до отказа может быть названа временем безотказной работы или временем до отказа.

Известно [1, 2], что отказ элементов РЭУ по своей физической сути является событием случайным. Случайной величиной, описывающей отказ, является время до отказа. Для математического описания времени до отказа элементов (кратко говорят – описания отказов) наиболее часто используются следующие законы: экспоненциальный; нормальный; Вейбулла (табл. 1.1).

Экспоненциальный закон традиционно используется для описания времени до отказа большинства элементов РЭУ. Отечественные и зарубежные методики расчёта надёжности РЭУ обычно исходят из этого допущения [3–9].

В последнее время экспериментально установлено, что время до отказа ряда элементов лучше описывается другими законами – нормальным, Вейбулла, логарифмически нормальным [2, 8].

Распределение Вейбулла хорошо описывает время до отказа большинства полупроводниковых приборов и интегральных микросхем ($\beta < 1$), а также некоторых механических элементов ($\beta > 2 \dots 3$).

При $\beta = 1$ распределение Вейбулла (см. табл. 1.1) превращается в экспоненциальное распределение, при $\beta > 2 \dots 3$ – приближается к нормальному закону.

Отказы некоторых типов элементов хорошо описываются **нормальным законом распределения**. Для параметров m и σ этого распределения [2]:

$$m = t_{cp}, \sigma = \sigma_t,$$

где t_{cp} – среднее время безотказной работы;

σ_t – среднее квадратическое отклонение (иначе стандартное отклонение) времени безотказной работы.

Так как наработка до отказа t – величина сугубо положительная, то распределение является не чисто нормальным, а усечённым нормальным. Так его называют потому, что область отрицательных значений наработки, как не имеющую физического смысла, отбрасывают (отсекают).

При значении $t_{\text{ср}}/\sigma_t > 2...3$, что обычно и имеет место на практике при использовании нормального закона в задачах оценки надёжности, в расчётах пользуются чисто нормальным распределением, не принимая во внимание область отрицательных значений наработки до отказа, лишённую физического смысла и составляющую в этом случае не более 0,14...2,5 %.

Нормальный закон распределения характерен для элементов, работа которых сопровождается заметными процессами старения и износа (электронно-лучевые трубки, кинескопы, тумблеры, переключатели и т. п.).

Для элементов, отказ которых происходит в результате усталостного разрушения, наработка до отказа неплохо описывается **логарифмически нормальным** законом.

Зная плотность распределения времени до отказа $w(t)$, можно определить вероятность безотказной работы элемента для любого заданного интервала времени работы (наработки) t_3 . Из рис. 1.1 видно, что эта вероятность $P(t_3)$ численно равна площади под кривой $w(t)$, лежащей правее точки $t = t_3$ (заштрихованная область), поэтому можно записать

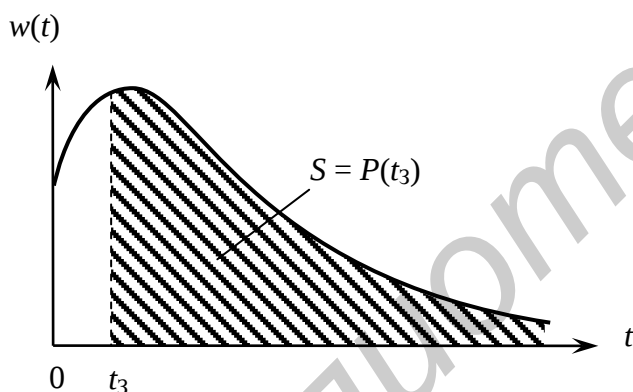


Рис. 1.1. Определение вероятности безотказной работы за время t_3

$$P(t_3) = \int_{t_3}^{\infty} w(t) dt. \quad (1.1)$$

Применяя выражение (1.1), можно получить формулы для определения $P(t_3)$ для любых законов распределения времени до отказа (см. табл. 1.1).

Среднюю наработку до отказа элемента, определяемую как математическое ожидание наработки до отказа, можно вычислить как [2]

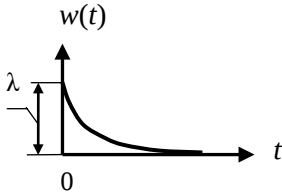
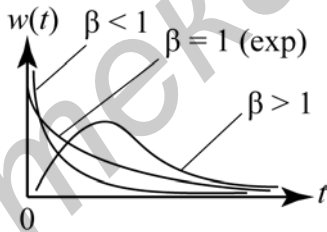
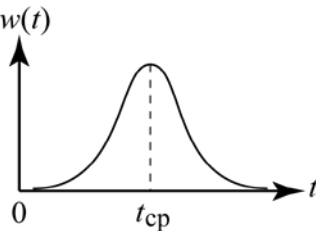
$$T_{\text{ср}} = \int_0^{\infty} P(t) dt. \quad (1.2)$$

С учётом выражения (1.2) получены формулы для определения $T_{\text{ср}}$ для основных законов распределения времени до отказа (см. табл. 1.1).

Иногда при решении практических задач по оценке и обеспечению показателей надёжности РЭУ аналитические расчёты могут оказаться весьма трудоёмкими либо ими вообще нельзя воспользоваться. В этих случаях поставленные задачи удобно решать, используя моделирование на ЭВМ отказов элементов.

Таблица 1.1

Законы распределения времени до отказа элементов РЭУ

Закон распределения времени до отказа	Выражение функции плотности распределения и связь параметров закона распределения с основными числовыми характеристиками времени до отказа: M_t и σ_t	График плотности распределения $w(t)$	Выражение для определения вероятности безотказной работы за заданное время t_3	Выражение для определения средней наработки до отказа T_{cp}
Экспоненциальный	$w(t) = \lambda e^{-\lambda t}; t \geq 0,$ где λ – параметр распределения $\lambda = \frac{1}{M_t}; \lambda = \frac{1}{\sigma_t}.$ Свойство распределения: $M_t = \sigma_t$		$P(t_3) = e^{-\lambda t_3}$	$T_{cp} = \frac{1}{\lambda}$
Вейбулла	$w(t) = \rho \beta t^{\beta-1} e^{-\rho t^\beta}; t \geq 0,$ где ρ, β – параметры распределения (β – коэффициент формы)		$P(t_3) = e^{-\rho t_3^\beta}$	$T_{cp} = \frac{\Gamma\left(\frac{1}{\beta} + 1\right)}{\rho^{1/\beta}},$ где $\Gamma\left(\frac{1}{\beta} + 1\right)$ – гамма-функция; $\Gamma\left(\frac{1}{\beta} + 1\right) = \int_0^\infty U^{1/\beta} \cdot e^{-U} dU$
Нормальный	$w(t) = \frac{1}{\sigma_t \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(t - t_{cp})^2}{2\sigma_t^2}\right]; t \geq 0,$ где t_{cp}, σ_t – параметры распределения $\begin{cases} m = t_{cp} = M_t \\ \sigma = \sigma_t \end{cases}$		$P(t_3) = \Phi\left(\frac{t_{cp} - t_3}{\sigma_t}\right),$ где $\Phi(\dots)$ – функция распределения стандартного нормального распределения ($m = 0, \sigma = 1$)	$T_{cp} \approx t_{cp}$

Примечание. Функцию $\Phi(\dots)$ обычно называют «нормальная функция распределения», для неё численными методами получена таблица значений (см., например, [1, с. 296]).

Будем считать, что РЭУ состоит из n элементов. При моделировании значение (реализацию) случайного времени до отказа t_i i -го элемента получают с учётом закона распределения этого времени, используя формулы, приведённые в [1, табл. 9.1, с. 270]. Выполняя моделирование надёжности РЭУ в j -й реализации, для всех n элементов с учётом законов распределения их времени до отказа получают значения случайных наработок до отказа $t_1^{(j)}, t_2^{(j)}, \dots, t_n^{(j)}$. Считают, что отказ РЭУ в j -й реализации наступает при отказе хотя бы одного из n элементов. Поэтому за отказ всего РЭУ в j -й реализации принимают отказ элемента, имеющего минимальную наработку до отказа:

$$t_j = \min[t_1^{(j)}, t_2^{(j)}, \dots, t_n^{(j)}],$$

где $t_i^{(j)}$ – наработка до отказа i -го элемента в j -й реализации РЭУ.

Таким способом получают N реализаций РЭУ и, следовательно, N значений времени до отказа РЭУ.

Количественные показатели безотказности РЭУ получают путём статистической обработки всех N значений времени до отказа РЭУ t_j ($j = 1, 2, \dots, N$).

Среднее время до отказа (среднее время безотказной работы) РЭУ определяют по выражению

$$T_{\text{ср}} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N t_j. \quad (1.3)$$

Вероятность безотказной работы за заданное время t_3 находят следующим образом:

$$P(t_3) = \frac{N_{\text{неот}}}{N} = \frac{N - N(t_3)}{N}, \quad (1.4)$$

где $N_{\text{неот}}$ – количество неотказавших РЭУ за время t_3 , т. е. реализаций, для которых $t_j \geq t_3$ ($j = 1, 2, \dots, N$);

$N(t_3)$ – количество реализаций РЭУ, для которых $t_j < t_3$ ($j = 1, 2, \dots, N$).

Для определения γ -процентной наработки до отказа можно использовать следующий алгоритм. Значения t_j ($j = 1, 2, \dots, N$), полученные при моделировании, располагают по убыванию. В итоге получают массив $T_1 \geq T_2 \geq \dots \geq T_N$. Элементом под номером $(\gamma/100)N$ этого массива будет определяться значение γ -процентной наработки до отказа.

В лабораторной работе показатели надёжности (а конкретно – безотказности) РЭУ определяются по результатам моделирования времени до отказа элементов. Со структурной схемой алгоритма моделирования надёжности РЭУ на ЭВМ и пояснением этой схемы можно ознакомиться в [1, с. 292–293, рис. 9.12].

Программа моделирования надёжности РЭУ на ЭВМ позволяет получать случайные значения наработок до отказа, отвечающие следующим законам распределения: экспоненциальному, нормальному, Вейбулла. Для получения

последовательности чисел (времени до отказа), распределённых по указанным законам, используются функциональные преобразования последовательности равномерно распределённых случайных чисел r в диапазоне $0...1$, генерируемых с помощью встроенной функции **random** (табл. 1.2).

Таблица 1.2

Вычислительные алгоритмы получения времени до отказа элементов

Закон распределения	Параметры распределения	Алгоритм вычисления случайного числа t [1, с. 270]
Экспоненциальный	λ	$-\frac{1}{\lambda} \ln(1-r)$
Вейбулла	ρ, β	$\left(-\frac{1}{\rho} \ln(1-r)\right)^{1/\beta}$
Нормальный	m, σ	$m + \sigma \left(\sum_{i=1}^{12} r_i - 6 \right)$

Для выполнения исследования надёжности отдельно рассматриваемого элемента с помощью учебной программы для ЭВМ необходимо принять, что в составе РЭУ содержится всего один элемент, количество реализаций N для получения достоверных результатов должно быть велико (тысячи–десятки тысяч).

В демонстрационном режиме моделирования времени до отказа транзисторов (как вида элементов) для обеспечения лучшей наглядности процесса отказа элементов на экране дисплея принято $N = 100$. Для повышения достоверности показателей надёжности, определяемых по результатам моделирования, число реализаций N на практике, в том числе и при выполнении исследований в лабораторной работе, следует брать не менее 1000.

1.3. Задания на экспериментальную часть лабораторной работы

1. Получить, используя моделирование на ЭВМ отказов элементов (программа **nts1** в папке **НТС**), данные, на основании которых:

а) построить график зависимости показателя T_{cp} от параметра λ экспоненциального распределения времени до отказа элемента; для построения графика использовать 5...7 точек;

б) сравнить показатели $P(t_3)$ для времени $t_3 = 5000$ ч двух элементов, взятых из партий, имеющих нормальные законы распределения времени до отказа, но с различными значениями параметров распределения t_{cp} и σ_t ;

в) определить показатели T_{cp} , T_γ и $P(t_3)$ для РЭУ, содержащего три элемента, в случае, если все элементы имеют экспоненциальный закон распределения времени до отказа, но с разными значениями параметра распределения λ ;

г) определить показатели T_{cp} , T_γ и $P(t_3)$ для РЭУ, содержащего три элемента, в случае, если элементы имеют различные законы распределения времени до отказа.

Примечание. При выполнении пп. а–г следует руководствоваться рекомендациями табл. 1.3 и указаниями программы для ЭВМ **nts1**.

Таблица 1.3

Рекомендуемые параметры моделирования надёжности элементов

Пункт исследования	Содержание исследования	Рекомендуемые значения параметров для рабочих условий применения элементов
1	Моделирование надёжности элемента и построение зависимости среднего времени безотказной работы от интенсивности отказов в случае экспоненциального закона распределения времени до отказа	Диапазон λ : $10^{-4} \dots 10^{-2}$ 1/ч
2	Моделирование надёжности элементов и сравнение по надёжности двух элементов, взятых из партий с различными значениями параметров нормального закона распределения времени до отказа	Элемент из первой партии: $t_{cp} = 10\,000 \dots 12\,000$ ч; $\sigma_t = 4000$ ч; элемент из второй партии: $t_{cp} = 6000 \dots 8000$ ч; $\sigma_t = 300$ ч; $t_3 = 5000$ ч
3	Моделирование надёжности радиоэлектронного устройства, условно включающего три элемента; законы распределения времени до отказа элементов экспоненциальные с различными значениями параметра распределения λ	Число элементов в РЭУ $n = 3$; диапазон $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$: $(1 \dots 5) \cdot 10^{-5}$ 1/ч; $t_3 = 1000$ ч; $\gamma = 90\%$
4	Моделирование надёжности радиоэлектронного устройства, условно включающего три элемента; законы распределения времени до отказа элементов разные: экспоненциальный, нормальный и Вейбулла	Число элементов в РЭУ $n = 3$; $t_3 = 1000$ ч; $\gamma = 90\%$. Законы распределения времени до отказа: экспоненциальный, Вейбулла, нормальный. Для экспоненциального закона $\lambda = 10^{-5}$ 1/ч. Для закона Вейбулла $\rho = 10^{-3}$ 1/ч; $\beta = 0,5$. Для нормального закона $t_{cp} = 9000$ ч; $\sigma_t = 4000$ ч

2. Выполнить аналитический расчёт показателей надёжности T_{cp} , T_γ и $P(t_3)$, используя для элементов те же показатели надёжности, что и при моделировании в случае выполнения пп. в, г задания 1 данного подраздела (см. табл. 1.3). Для расчётов можно использовать один из источников [2, 3, 8, 9]. При расчёте показателя T_{cp} в случае разных законов распределения наработки до отказа следует воспользоваться табл. П.1 и П.2 приложения. В случае нехватки времени на аудиторных занятиях задание может выполняться дома.

3. Написать отчёт по работе.

1.4. Содержание отчёта

1. Формулировка цели работы.

2. Таблица с координатами экспериментальных точек (по результатам моделирования), используемых для построения графика зависимости $T_{cp} = f(\lambda)$.

3. График зависимости $T_{cp} = f(\lambda)$, построенный по экспериментальным данным. При построении графика необходимо на координатную сетку нанести экспериментальные точки и провести аппроксимирующую линию, математическое выражение которой должно быть получено по прикладным программам для ЭВМ и записано на свободном поле координатной сетки.

4. Результаты исследования надёжности (вероятности безотказной работы) двух элементов, имеющих нормальное распределение времени до отказа, но с разными значениями параметров t_{cp} и σ_t , а также объяснение с помощью геометрической интерпретации (плотностей распределения) кажущегося парадокса: **элемент, взятый из партии с меньшим значением показателя t_{cp} имеет большую вероятность безотказной работы** для наработки $t_3 = 5000$ ч.

5. Сравнительная оценка для РЭУ показателей безотказности T_{cp} , T_γ и $P(t_3)$, полученных аналитическим способом (расчётом) и найденных с помощью моделирования на ЭВМ отказов элементов для случая экспоненциального распределения времени до отказа элементов.

6. Сравнительная оценка для РЭУ показателей безотказности T_{cp} , T_γ и $P(t_3)$, полученных аналитическим способом (расчётом) и найденных с помощью моделирования на ЭВМ отказов элементов для случая разных законов распределения времени до отказа элементов.

Примечание. Ответы на пп. 5, 6 следует представить в виде табл. 1.4.

Таблица 1.4

Форма записи показателей надёжности для РЭУ

Информация об элементах РЭУ			Значение T_{cp} РЭУ, полученное		Значение $T_\gamma = 90\%$ РЭУ, полученное		Значение $P(t_3)$ РЭУ, полученное	
Номер элемента	Закон распределения времени до отказа	Параметры закона распределения	моделированием отказов элементов	расчётом	моделированием отказов элементов	расчётом	моделированием отказов элементов	расчётом
1	...	...	...	...	...	...	...	...
2	...	...						
3	...	...						

7. Выводы по работе с обязательным объяснением причины расхождения показателей T_{cp} , T_γ и $P(t_3)$, полученных аналитическим методом и найденных с использованием моделирования отказов элементов.

1.5. Контрольные вопросы

1. Почему на практике для решения практических задач прибегают к методам моделирования?

2. Значение какой случайной величины, имеющей отношение к отказу, получают при решении задач оценки надёжности методом моделирования?

3. Что принимают во внимание при получении случайных реализаций времени до отказа изделий (элементов, устройств)?

4. Для каких элементов может быть выбран нормальный (экспоненциальный, Вейбулла, логарифмически нормальный) закон распределения времени до отказа?

5. Как в лабораторной работе расчётно-аналитически определялось среднее время безотказной работы РЭУ в случае разных законов распределения наработки до отказа его элементов?

6. Какие действия можно предпринять для повышения достоверности показателей надёжности РЭУ, определяемых по результатам моделирования?

7. Чем можно объяснить расхождение показателей надёжности РЭУ, полученных расчётно-аналитическим методом и найденных обработкой результатов моделирования?

Литература

1. Надёжность в технике, основные понятия. Термины и определения. ГОСТ 27.002–89. – Введ. 1990–07–01. – М. : Изд-во стандартов, 1990. – 24 с.

2. Боровиков, С. М. Теоретические основы конструирования, технологии и надёжности: учебник для студ. инж.-техн. спец. вузов / С. М. Боровиков. – Минск : Дизайн ПРО, 1998. – 336 с.

3. Боровиков, С. М. Расчёт показателей надёжности радиоэлектронных средств : учеб.-метод. пособие / С. М. Боровиков, И. Н. Цырельчук, Ф. Д. Троян ; под ред. С. М. Боровикова. – Минск : БГУИР, 2010. – 68 с.

4. Надёжность электрорадиоизделий, 2006 : справочник / С. Ф. Прытков [и др.]. – М. : ФГУП «22 ЦНИИ МО РФ», 2008. – 641 с.

5. Reliability prediction of electronic equipment : Military Handbook MIL–HDBK-217F. – Washington : Department of defense DC 20301, 1995. – 205 p.

6. A universal model for reliability prediction of Electronics components, PCBs and equipment. RDF 2000 : reliability data handbook / Paris : UTE C 80-810. 2000. – 99 p.

7. Reliability Prediction Model for Electronic Equipment : The Chinese Military / Commercial Standard GJB/z 299B. – Yuntong Forever Sci.-тек. Co. Ltd. China 299B.

8. Надёжность технических систем : справочник / Ю. К. Беляев [и др.] ; под ред. И. А. Ушакова. – М. : Радио и связь, 1985. – 608 с.

9. Половко, А. М. Основы теории надёжности / А. М. Половко, С. В. Гуров. – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб. : БХВ-Петербург, 2006. – 704 с.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2

ПРОВЕРКА ПРАВИЛЬНОСТИ ВЫБОРА ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРОННОГО КАСКАДА ПО КОЭФФИЦИЕНТАМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ

2.1. Цель работы

Проверка правильности выбора элементов с точки зрения регламентированных максимальных значений коэффициентов их электрической нагрузки.

Примечание. Элемент считается выбранным правильно, если его номинальная (допустимая по ТУ) эксплуатационная электрическая нагрузка такова, что коэффициент электрической нагрузки при работе элемента в составе электронного каскада не превышает регламентированного значения.

2.2. Теоретические сведения

2.2.1. Коэффициенты электрической нагрузки элементов

Степень электрической нагруженности элементов радиоэлектронных устройств (РЭУ) характеризуется коэффициентами электрической нагрузки, кратко – коэффициентом нагрузки. Количественно коэффициент нагрузки K_n подсчитывается с помощью выражения

$$K_n = \frac{F_{\text{раб}}}{F_{\text{ном}}}, \quad (2.1)$$

где $F_{\text{раб}}$ – значение электрической нагрузки элемента в рабочем режиме, т. е. той фактической нагрузки, которая имеет место на данном элементе;

$F_{\text{ном}}$ – номинальная или максимально допустимая по ТУ нагрузка того элемента, который реализует в электрической схеме функцию рассматриваемого схемного элемента.

В качестве электрической нагрузки F для элементов выбирают такой параметр его электрического режима, который в наибольшей степени влияет на безотказность данного элемента. Например, для резисторов это мощность рассеивания, для конденсаторов – прикладываемое к обкладкам напряжение и т. д. [1, 2].

Пример 2.1. Через коллекторную цепь транзистора протекает ток $I_K = 10$ мА (рис. 2.1). Функцию схемного элемента $R1$ реализует резистор типа С2-23 с номинальным значением сопротивления $R1_{\text{ном}} = 1$ кОм и номинальной мощностью рассеивания $P_{\text{ном}} = 0,25$ Вт.

Необходимо определить, какое значение K_n будет иметь место для выбранного резистора.

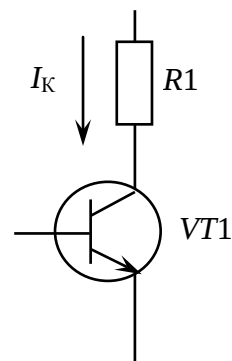


Рис. 2.1. Коллекторная цепь транзистора

Решение

1. В качестве нагрузки F для резисторов используют мощность рассеивания P . Поэтому согласно формуле (2.1)

$$K_H = \frac{P_{\text{раб}}}{P_{\text{ном}}}.$$

2. Из условия примера: $P_{\text{ном}} = 0,25$ Вт.

3. Зная значение тока I_K , протекавшего через резистор $R1$, и номинальное значение сопротивления этого резистора, находим $P_{\text{раб}}$:

$$P_{\text{раб}} = I_K^2 \cdot R1 = (10 \cdot 10^{-3} \text{ А})^2 \cdot 10^3 \text{ Ом} = 0,1 \text{ Вт}.$$

4. Определяем коэффициент нагрузки резистора для номинального режима работы:

$$K_H = \frac{P_{\text{раб}}}{P_{\text{ном}}} = \frac{0,1}{0,25} = 0,4.$$

Нетрудно заметить, что если в качестве $R1$ взять резистор с номинальной мощностью рассеивания 0,5 Вт, то K_H этого резистора будет равен значению 0,2.

Для многих элементов с точки зрения надёжности принципиальными могут быть несколько параметров электрического режима – несколько характеристик F . Например, для биполярных транзисторов – это ток, протекающий через коллекторный переход; напряжение на переходе; мощность, рассеиваемая на переходе. Поэтому применительно к транзисторам можно говорить о коэффициентах нагрузки по току $K_H^{(I)}$, по напряжению $K_H^{(U)}$ и по мощности $K_H^{(P)}$.

2.2.2. Априорное ограничение нагрузки элементов РЭУ

Диапазон рекомендуемых значений коэффициентов электрической нагрузки типовых элементов РЭУ составляет $K_H \approx 0,2 \dots 0,6$. С точки зрения надёжности недопустимо использовать элементы при значении K_H , превышающем единицу (даже хотя бы по одному из параметров электрического режима). С целью повышения надёжности РЭУ регламентируются предельно допустимые K_H элементов. Причём в общем случае для разных элементов и различных классов РЭУ регламентируемые предельно допустимые значения K_H могут различаться [2]. Однако в любом случае указанные значения не должны превышать единицу.

Такая регламентация является разумным компромиссом между надёжностью элемента при его использовании в составе РЭУ и технико-экономической эффективностью использования элемента.

Известно [2], что интенсивность отказов многих элементов является нелинейной функцией (обозначена через φ) окружающей температуры $T_{\text{окр}}$ и коэффициента нагрузки K_n , т. е.

$$\lambda(v) = \varphi(T_{\text{окр}}, K_n),$$

где $\lambda(v)$ – интенсивность отказов элемента с учётом $T_{\text{окр}}$ и K_n (символ v подчёркивает учёт $T_{\text{окр}}$ и K_n).

Поэтому регламентированный предельный коэффициент электрической нагрузки устанавливают в той области, где кривая интенсивности отказов $\lambda(v)$ при максимально возможной для данного РЭУ окружающей температуре начинает круто возрастать. Например, для металлоплёночных резисторов по результатам опытных данных кривые интенсивностей отказов имеют вид, приведённый на рис. 2.2.

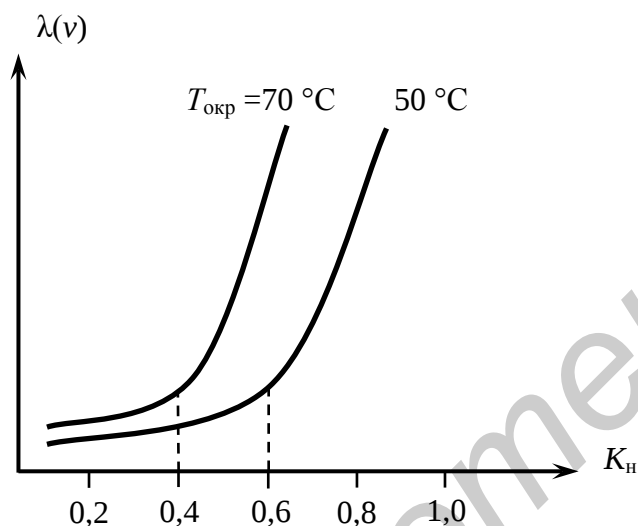


Рис. 2.2. Зависимость интенсивности отказов $\lambda(v)$ от коэффициента электрической нагрузки для резисторов

Из рис. 2.2 видно, что при средней температуре внутри блоков РЭУ (стоек, шкафов) порядка $50\ldots 70\text{ }^{\circ}\text{C}$ наблюдается резкое увеличение интенсивности отказов резисторов при $K_n \approx 0,4\ldots 0,6$. Поэтому с точки зрения надёжности коэффициент нагрузки резисторов не должен превышать значения $K_n = 0,4\ldots 0,6$.

Указанный принцип выбора предельных электрических нагрузок применяется для всех элементов РЭУ, по которым имеются опытные данные.

Например, для наземной (полевой, переносимой, автомобильной) и судовой аппаратуры следует использовать регламентацию предельных энергетических нагрузок в соответствии с табл. 2.1 [3].

Для проверки выполнения ограничительных требований по коэффициентам нагрузки используют результаты расчёта и экспериментальной проверки режимов на макетах устройств. Сводка этих данных оформляется разработчиком в виде карт режимов всех элементов.

Коэффициенты нагрузки элементов можно определить с учётом номинальных значений параметров всех элементов и питающих напряжений, т. е. номинальных электрических режимов. Обозначим коэффициенты электрической нагрузки, найденные с учётом номинальных режимов, через $K_{n.\text{ном}}$. Несмотря на то что для всех элементов обеспечивались условия $K_{n.\text{ном } i} < K_{n.\text{пред } i}$ (где индекс i означает i -й элемент), реальные коэффициенты нагрузки для

отдельных элементов оказываются заметно выше указанных в табл. 2.1. Происходит это в результате неудачного сочетания (комбинации) отклонений от номинала параметров элементов и источников питания. Сказанное иллюстрируется примером 2.2.

Таблица 2.1

Регламентируемые предельные значения коэффициентов нагрузки элементов

Элементы	Параметр нагрузки	$K_{н.пред}$
1. Резисторы непроволочные	Мощность рассеивания	0,5
2. Резисторы проволочные	Мощность рассеивания	0,6
3. Транзисторы биполярные	Мощность на переходе	0,5
	Напряжение на переходе	0,7
	Ток коллектора	0,9
4. Полупроводниковые диоды	Прямой ток	0,9
	Обратное напряжение	0,7
	Мощность рассеивания на переходе	0,5
5. Переключатели, микропереключатели, тумблеры	Коммутируемый ток	0,5
	Коммутируемая мощность	0,3
6. Соединители (разъёмы), гнезда штепсельные	Напряжение на контакте	0,3
	Ток через контакт	0,5

Пример 2.2. На рис. 2.3 приведён фрагмент электрической схемы.

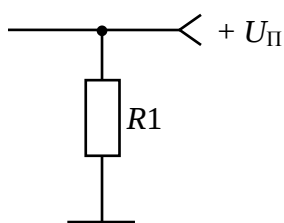


Рис. 2.3. Фрагмент электрической схемы

$$U_{\Pi} = 10 \text{ В} \pm 10 \%, R1 = 430 \text{ Ом} \pm 10 \%.$$

Номинальная мощность рассеивания резистора $P_{ном} = 0,5 \text{ Вт}$.

Необходимо выяснить, отвечает ли выбранный резистор условию $K_n \leq K_{н.пред}$.

Решение

1. Нетрудно определить, что коэффициент нагрузки резистора $R1$ для номинального электрического режима $K_{н.ном} \approx 0,47$. По табл. 2.1 для постоянных резисторов $K_{н.пред} = 0,5$. Условие $K_{н.ном} \leq K_{н.пред}$ выполняется.

2. Можно убедиться, что за счёт неблагоприятного сочетания отклонений параметра резистора $R1$ и источника питания U_{Π} реальный коэффициент нагрузки может оказаться заметно выше и не будет отвечать требованию табл. 2.1. Обозначим коэффициент нагрузки, соответствующий наихудшему (экстремальному) случаю, через $K_{н.макс}$. Определим это значение. Мощность, рассеиваемая резистором в экстремальном режиме, определится как

$$P_{\text{раб макс}} = \frac{U_{\Pi \text{ макс}}^2}{R1_{\text{мин}}} = \frac{(10+1)^2}{(430-43)} \approx 0,313 \text{ Вт},$$

так как экстремальному режиму соответствуют значения $U_{\Pi} = U_{\text{макс}}$ и $R1 = R1_{\text{мин}}$.

$$K_H = \frac{P_{\text{раб max}}}{P_{\text{ном}}} = \frac{0,313}{0,5} = 0,63,$$

что выше регламентируемой предельной нагрузки для резисторов (см. табл. 2.1).

Поэтому, чтобы не совершить ошибку в выборе эксплуатационной электрической характеристики элемента, нужно принять во внимание не номинальное значение коэффициента нагрузки $K_{H, \text{ном}}$, а максимальный коэффициент нагрузки элемента по данному электрическому параметру. Этот максимальный коэффициент нагрузки $K_{H, \text{max}}$ должен быть определён из условия наиболее неблагоприятного сочетания отклонений от номиналов параметра рассматриваемого элемента, соседних элементов, источников питания и внешних нагрузок, т. е. для экстремального режима работы элемента. В сложных случаях для определения $K_{H, \text{max}}$ целесообразно использовать ЭВМ, применяя покаскадный расчёт экстремальных режимов нагрузки элементов.

В инженерной практике находят широкое применение приближённые методы расчёта, позволяющие определить искомые величины с погрешностью, не превышающей 15...20 %. Такой точности достаточно в большинстве практических случаев.

2.3. Объект исследования. Особенности учебной программы для ЭВМ

Объектом исследования в лабораторной работе являются различные электронные каскады, как правило, с использованием транзисторов и интегральных микросхем.

В учебной программе для ЭВМ по умолчанию рассматривается простейший НЧ усилительный каскад, электрическая принципиальная схема которого приведена на рис. 2.4.

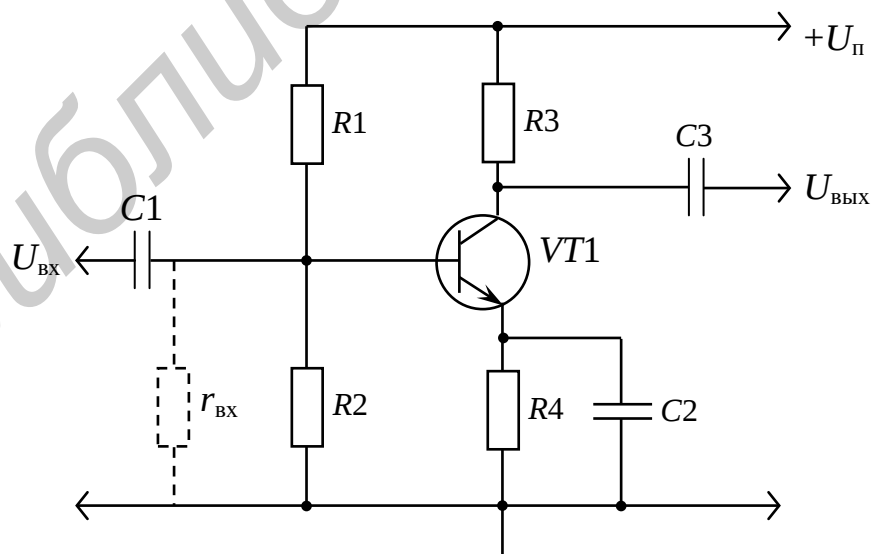


Рис. 2.4. Электрическая принципиальная схема НЧ усилительного каскада

Тип транзистора, номинальные значения параметров элементов, значения допусков на параметры, а также номинальные (допустимые по ТУ) эксплуатационные электрические характеристики элементов, напряжение источника питания $U_{\text{п}}$ и допуск на него указаны в табл. 2.2. Методика проведения исследований поясняется на примере этого каскада. Элементы каскада $C1$, $C2$ и $C3$ для упрощения исследований во внимание не принимаются.

Программа для ЭВМ позволяет многократно корректировать информацию, необходимую для исследования элементов каскада, и определять максимальные коэффициенты нагрузки $K_{\text{н max}}$, соответствующие экстремальному режиму работы элементов. При этом необходимо иметь в виду, что экстремальный режим для одного элемента (например для $R1$) необязательно будет экстремальным режимом для другого элемента (например для $R3$).

При расчёте экстремальных режимов работы элементов исследуемого каскада (см. рис. 2.4) учитывается эквивалентное входное сопротивление цепи база – эмиттер ($r_{\text{вх}}$), включённое параллельно резистору $R2$:

$$r_{\text{вх}} = r_{\text{б}} + (1 + \beta)R4 \approx (1 + \beta)R4, \quad (2.2)$$

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

β – коэффициент усиления транзистора по току в схеме с общим эмиттером.

Выражение (2.2) использовано в программе для ЭВМ при расчёте экстремальных режимов элементов электронного каскада.

Поиск экстремального режима, т. е. неблагоприятного сочетания отклонений параметров элементов и питающего напряжения, выполняется последовательно для всех элементов, кроме $C1$, $C2$ и $C3$. Для транзистора экстремальный режим определяется лишь по одному параметру режима: току коллектора $I_{\text{к}}$. Поиск экстремального режима для рассматриваемого элемента сводится к указанию (назначению) предельных отклонений параметров как рассматриваемого элемента, так и других элементов каскада и напряжения источника питания. Этот процесс должен выполняться целенаправленно, т. е. с учётом влияния характера отклонения параметра от номинала (нижнее или верхнее предельное отклонение) на электрический режим работы рассматриваемого элемента.

Программа для ЭВМ, используемая в лабораторной работе, составлена таким образом, что проверяется соответствие сочетания предельных отклонений параметров элементов и питающего напряжения экстремальному режиму. Если режим не является экстремальным, то программа для ЭВМ предлагает указать новое сочетание предельных отклонений параметров, которое, по мнению студента, может соответствовать экстремальному режиму работы рассматриваемого элемента. И так до тех пор, пока экстремальный режим не будет найден.

Таблица 2.2

Варианты заданий для выполнения экспериментальной части лабораторной работы

Номер вариан- та	R1		R2		R3		R4		$U_{\text{п}}$	VT1		
	Номинал и допуск	$P_{\text{ном}}$ (ТУ), Вт	Номинал и допуск	$P_{\text{ном}}$ (ТУ), Вт	Номинал и допуск	$P_{\text{ном}}$ (ТУ), Вт	Номинал и допуск	$P_{\text{ном}}$ (ТУ), Вт	Номинальное значение и допуск	Тип	β_{min} ... β_{max}	$I_{\text{К пред}}$ (ТУ), мА
1	$27\text{к} \pm 10 \%$	0,125	$5,1\text{к} \pm 10 \%$	0,125	$4,7\text{к} \pm 10 \%$	0,125	$0,47\text{к} \pm 10 \%$	0,125	$12\text{В} \pm 10 \%$	КТ201А	20–60	20
2	$47\text{к} \pm 10 \%$	0,125	$2,2\text{к} \pm 10 \%$	0,125	$8,2\text{к} \pm 10 \%$	0,125	$0,33\text{к} \pm 10 \%$	0,125	$15\text{В} \pm 10 \%$	КТ203Б	30–100	10
3	$33\text{к} \pm 10 \%$	0,125	$4,7\text{к} \pm 10 \%$	0,125	$2,7\text{к} \pm 10 \%$	0,125	$0,16\text{к} \pm 10 \%$	0,125	$7\text{В} \pm 10 \%$	КТ203В	30–200	10
4	$13\text{к} \pm 10 \%$	0,125	$1,3\text{к} \pm 10 \%$	0,125	$1,0\text{к} \pm 10 \%$	0,125	$0,18\text{к} \pm 10 \%$	0,125	$15\text{В} \pm 10 \%$	КТ315В	20–90	100
5	$75\text{к} \pm 10 \%$	0,125	$10\text{к} \pm 10 \%$	0,125	$1,2\text{к} \pm 10 \%$	0,125	$0,18\text{к} \pm 10 \%$	0,125	$15\text{В} \pm 10 \%$	КТ315Г	50–350	100
6	$27\text{к} \pm 10 \%$	0,125	$8,2\text{к} \pm 10 \%$	0,125	$5,1\text{к} \pm 10 \%$	0,125	$0,75\text{к} \pm 10 \%$	0,125	$10\text{В} \pm 10 \%$	КТ342Б	200–500	50
7	$68\text{к} \pm 10 \%$	0,125	$4,7\text{к} \pm 10 \%$	0,125	$3,3\text{к} \pm 10 \%$	0,125	$0,16\text{к} \pm 10 \%$	0,125	$10\text{В} \pm 10 \%$	КТ342Г	50–125	50
8	$27\text{к} \pm 10 \%$	0,125	$4,7\text{к} \pm 10 \%$	0,125	$3,3\text{к} \pm 10 \%$	0,125	$0,47\text{к} \pm 10 \%$	0,125	$12\text{В} \pm 10 \%$	КТ373А	100–250	50
9	$47\text{к} \pm 10 \%$	0,125	$2,2\text{к} \pm 10 \%$	0,125	$8,2\text{к} \pm 10 \%$	0,125	$0,33\text{к} \pm 10 \%$	0,125	$15\text{В} \pm 10 \%$	КТ373Г	50–125	50

Если величины $K_{n \max i}$ для каждого элемента найдены, то заключение о правильности использования i -го элемента по коэффициенту его нагрузки делается при выполнении условия

$$K_{n \max i} \leq K_{n.пред i}, \quad (2.3)$$

где $K_{n.пред i}$ – регламентированное предельное (максимальное) значение коэффициента нагрузки i -го вида элемента (см. табл. 2.1).

Рекомендации по замене элемента даются в случае невыполнения условия (2.3). Суть рекомендаций должна сводиться к замене рассматриваемого элемента новым элементом с такой эксплуатационной электрической характеристикой, для которой условие вида (2.3) будет выполняться.

2.4. Задания на экспериментальную часть лабораторной работы

1. Уточнить у преподавателя номер исследуемого каскада в соответствии с табл. 2.2 или специально разработанной служебной программой. Запустить учебную программу для ЭВМ с именем **nts2**, используемую для моделирования экстремальных режимов работы элементов каскада.

2. Ввести информацию о параметрах и эксплуатационных электрических характеристиках элементов согласно выполняемому варианту задания, задать номинальное значение напряжения источника питания. При исследовании НЧ усилительного каскада эта информация соответствует табл. 2.2.

3. Используя возможности программы для ЭВМ, получить последовательно для элементов $R1...R4$ и $VT1$ данные для построения графиков зависимости K_n элемента от производственного разброса его основного функционального параметра: для резисторов – относительного производственного разброса сопротивления, для транзистора – коэффициента усиления по току. При этом параметры других элементов и напряжения источника питания принять равными номинальным (средним значениям).

4. Последовательно для каждого из элементов исследуемого каскада найти значение величины $K_{n \max i}$, соответствующее экстремальному режиму их работы. Для транзистора значение величины $K_{n \max i}$ определяется только по одному параметру – току коллектора. Процесс нахождения величин $K_{n \max i}$ должен выполняться целенаправленно, т. е. с учётом влияния характера отклонения параметра элемента от номинала (нижнее или верхнее предельное отклонение) на электрический режим работы рассматриваемого элемента, что требует от студента детального анализа электрической схемы. Рекомендуется также принять во внимание результаты, полученные при выполнении задания, указанного в п. 3.

5. Сделать выводы о правильности использования элементов по коэффициентам их нагрузки и при необходимости заменить элементы, не отвечающие условию (2.3): $K_{n \max i} \leq K_{n.пред i}$.

Примечания: 1. Экспериментальная часть работы предусматривает последовательное выполнение определённого числа вариантов исследуемого каскада (заданий табл. 2.2). Конкретные указания даются преподавателем.

2. По усмотрению преподавателя для исследований могут быть предложены и другие каскады, в том числе схемы, содержащие операционные усилители. В этом случае для анализа электрического режима работы каскада рекомендуется использовать программное средство Electronic Workbench (Multisim), руководство по которому находится в каталоге учебной дисциплины.

2.5. Содержание отчёта

1. Формулировка цели работы.
2. Схема исследуемого электронного каскада.
3. Исходные данные для выполнения экспериментальной части работы согласно вариантам заданий.
4. Полученные табличные данные и построенные по этим данным графики зависимости K_n элемента от производственного разброса его основного функционального параметра: для резисторов – относительного производственного разброса сопротивления, для транзистора – коэффициента усиления по току.
5. Значения величин $K_{n \max i}$, полученные моделированием на ЭВМ экстремального режима работы элементов; эти величины рекомендуется привести совместно с другой информацией по форме, приведённой в табл. 2.3.

Таблица 2.3

Отчётная форма записи коэффициентов нагрузки

Позиционное обозначение элемента	Номинальное значение и допуск параметра	Характеристика $F_{\text{ном}}$ (по ТУ)	$K_{n \min}$	$K_{n \text{ ном}}$	$K_{n \max}$	Регламентируемый $K_{n \text{ пред}}$
R1	18 кОм $\pm$ 10 %	0,125 Вт	0,09	0,13	0,21	0,5
...	...	...	...	...	...	...

6. Выводы по работе с указанием правильности использования i -го элемента по коэффициенту его нагрузки и (при необходимости) рекомендациями по замене элемента.

2.6. Контрольные вопросы

1. Что понимают под коэффициентом электрической нагрузки элементов?
2. Какую характеристику элемента используют при расчёте коэффициента нагрузки?
3. Укажите диапазон рекомендуемых значений коэффициентов электрической нагрузки типовых элементов РЭУ.

4. Из каких соображений устанавливаются предельные значения коэффициентов электрической нагрузки?

5. Какую информацию можно получить, рассматривая нелинейный характер зависимости интенсивности отказов элементов от коэффициентов их электрической нагрузки?

6. Почему для некоторых элементов используют коэффициенты нагрузки, рассчитанные по различным параметрам электрического режима?

7. Почему понятие «коэффициент электрической нагрузки» не применяют к некоторым элементам РЭУ? Для ответа на вопрос ознакомиться с рассмотрением коэффициентов нагрузки типовых элементов в [2].

8. Как сказывается на значении коэффициента электрической нагрузки производственный разброс параметров соседних элементов и питающих напряжений?

9. Как экспериментально можно уточнить соответствие коэффициента электрической нагрузки требованиям, принимая во внимание как производственный разброс параметров элементов и питающих напряжений, так и рекомендуемые предельно допустимые значения коэффициента?

10. К чему сводится замена элемента в случае, если значение $K_{н\max}$, соответствующее экстремальному режиму, превышает рекомендуемое предельно допустимое $K_{н\text{пред}}$? Ответ дать с учётом данных, полученных в лабораторной работе.

Литература

1. Боровиков, С. М. Теоретические основы конструирования, технологии и надёжности : учебник для студ. инж.-техн. спец. вузов / С. М. Боровиков. – Минск : Дизайн ПРО, 1998. – 336 с.

2. Боровиков, С. М. Расчёт показателей надёжности радиоэлектронных средств : учеб.-метод. пособие / С. М. Боровиков, И. Н. Цырельчук, Ф. Д. Троян ; под ред. С. М. Боровикова. – Минск : БГУИР, 2010. – 68 с.

3. Улинич, Р. Б. Практическое обеспечение надёжности радиоэлектронной аппаратуры при проектировании / Р. Б. Улинич. – М. : Радио и связь, 1985. – 85 с.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАДЁЖНОСТИ

ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ МЕТОДОМ ПРЯМОГО ПЕРЕБОРА ЕЁ РАБОТОСПОСОБНЫХ СОСТОЯНИЙ

3.1. Цель работы

Определение вероятности безотказной работы электронной системы безопасности (ЭСБ) как разновидности технической системы методом прямого перебора её работоспособных состояний.

3.2. Теоретические сведения

В ряде случаев технические системы, в том числе ЭСБ, имеют с точки зрения надёжности такую структуру соединения (или взаимодействия) их составных частей, которая не сводится к параллельно-последовательным или последовательно-параллельным схемам. Примером такой системы может служить мостовая схема (рис. 3.1).

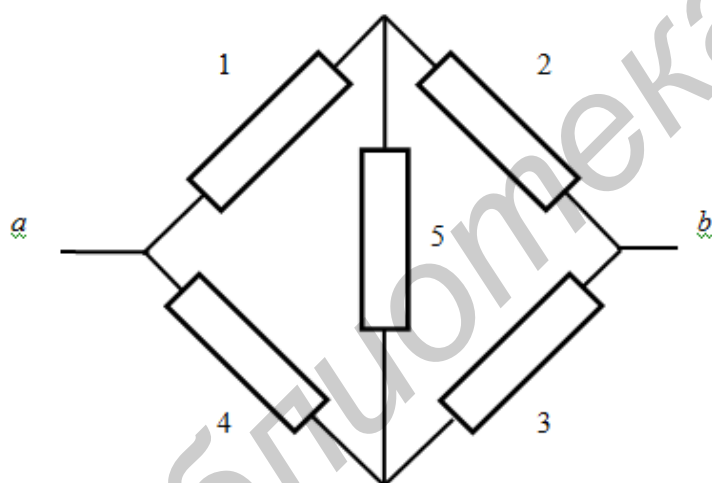


Рис. 3.1. Мостовая схема соединения устройств ЭСБ с точки зрения надёжности

На практике к подобным схемам можно отнести ЭСБ, содержащие в своём составе информационно-компьютерные подсистемы.

Будем считать, что рассматриваемая ЭСБ содержит в своём составе n устройств. ЭСБ может находиться в двух состояниях: работоспособности и отказа. Состояние ЭСБ обозначим символом R . Будем считать, что R принимает значение 1, если ЭСБ работоспособна, и значение 0, если она отказала. Состояние j -го устройства ЭСБ обозначим символом x_j . Будем считать, что x_j принимает значение 1, если j -е устройство работает безотказно, и значение 0, если оно отказало ($j = 1, 2, \dots, n$).

Состояние ЭСБ зависит от состояния её устройств, т. е.

$$R = R(x_1, x_2, \dots, x_n). \quad (3.1)$$

Функцию (3.1) будем называть структурной функцией системы. Для реальных систем имеют место следующие соотношения:

$$R(0, 0, \dots, 0) = 0;$$

$$R(1, 1, \dots, 1) = 1;$$

$$R(x_1, x_2, \dots, x_n) \geq R(y_1, y_2, \dots, y_n) \text{ при условии, что } x_j \geq y_j, (j = 1, 2, \dots, n).$$

Физически последнее условие означает, что отказ устройства не может перевести систему из неработоспособного состояния в работоспособное.

С методами расчёта и оценки надёжности систем, не сводящихся к параллельно-последовательным или последовательно-параллельным схемам, можно ознакомиться в [1, 2].

Наиболее простым методом расчёта вероятности безотказной работы указанных технических систем является метод прямого перебора работоспособных состояний системы. Этот метод с успехом может быть применён и для расчёта надёжности систем, сводящихся с точки зрения надёжности к параллельно-последовательным или последовательно-параллельным схемам соединения устройств. Однако применение метода оправдано при небольшом числе устройств в составе системы ($n \leq 6 \dots 7$).

Суть метода прямого перебора. С учётом критерия отказа ЭСБ всё множество её технических состояний G разбивается на два подмножества: работоспособных состояний G_1 и неработоспособных состояний G_0 . Для каждого состояния ЭСБ $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ можно вычислить его вероятность p_X и далее найти вероятность безотказной работы ЭСБ:

$$R = P\{X \in G_1\} = \sum_{X \in G_1} p_X, \quad (3.2)$$

где $P\{\dots\}$ здесь и далее означает вероятность события, указанного в фигурных скобках.

Вероятность отказа ЭСБ может быть определена как

$$Q = P\{X \in G_0\} = \sum_{X \in G_0} p_X. \quad (3.3)$$

Для вероятности состояния системы X в предположении независимости устройств с точки зрения возникновения их отказов справедлива формула

$$p_X = \prod_{j=1}^n p_{x_j}, \quad (3.4)$$

где p_{x_j} – вероятность состояния x_j j -го устройства ЭСБ ($x_j = 1$ или $x_j = 0$).

Пример 3.1. Схема расчёта надёжности ЭСБ соответствует рис. 3.1. Найдём для системы вероятность состояния

$$X = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5\} = \{1, 0, 1, 0, 1\}. \quad (3.5)$$

Решение

1. Можно убедиться, что указанное состояние системы принадлежит подмножеству работоспособных состояний, поскольку для этого состояния ЭСБ при движении от точки a к точке b на схеме (модели) имеет место непрерывный путь, т. е. нет обрыва.

2. Вероятность состояния (3.5) в соответствии с выражением (3.4) равна

$$p_X = r_1 q_2 r_3 q_4 r_5, \quad (3.6)$$

где r_j – вероятность безотказной работы j -го устройства ЭСБ для заданного времени работы t_3 , аргумент t_3 для простоты записи опущен ($j = 1, 3, 5$); q_j – вероятность отказа j -го устройства для времени t_3 ($j = 2, 4$; $q_j = 1 - r_j$).

Пример 3.2. Требуется определить вероятность безотказной работы ЭСБ, структурная схема которой показана на рис. 3.2.

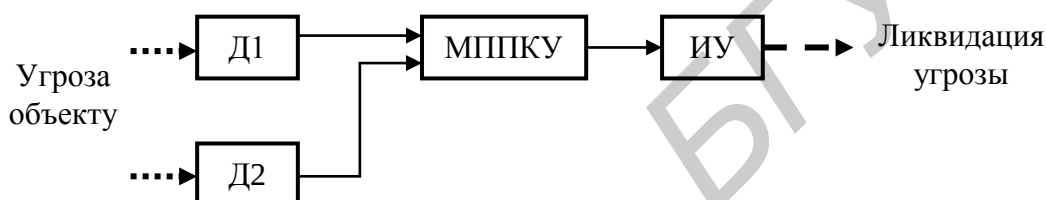


Рис. 3.2. Структурная схема ЭСБ:
Д1, Д2 – датчики; МППКУ – микропроцессорное приёмно-контрольное устройство; ИУ – исполнительное устройство

Пусть для устройств ЭСБ информация о вероятностях безотказной работы (r_j) и вероятностях отказа (q_j) для заданного времени работы t_3 соответствует данным табл. 3.1. Для простоты записи здесь и далее аргумент t_3 при вероятностях опущен.

Таблица 3.1

Информация о надёжности устройств ЭСБ

Обозначение вероятности	Значение вероятности для устройства ЭСБ			
	Д1	Д2	МППКУ	ИУ
r_j	0,85	0,85	0,95	0,93
q_j	0,15	0,15	0,05	0,07

Будем считать, что ЭСБ находится в работоспособном состоянии в случаях, если работоспособен хотя бы один из датчиков (Д1 или Д2) и работоспособны устройства МППКУ и ИУ.

Решение

1. Нетрудно убедиться, что схема расчёта надёжности (СРН) рассматриваемой ЭСБ примет вид, показанный на рис. 3.3.

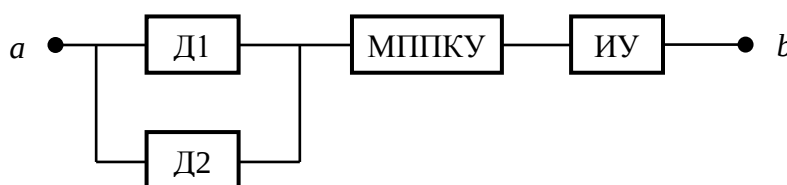


Рис. 3.3. Схема расчёта надёжности (модель)

СРН представляет собой модель (условность), согласно которой ЭСБ теряет работоспособность, если на схеме (модели) от точки a до точки b нет ни одного замкнутого пути.

2. Для определения вероятности безотказной работы ЭСБ используем метод прямого перебора состояний работоспособности. Возможные технические состояния (множество G), полученные с использованием СРН, приведены в табл. 3.2.

Таблица 3.2

Состояния устройств ЭСБ с точки зрения работоспособности

Номер состояния ЭСБ i	Состояние устройства				Принадлежность состояния ЭСБ к подмножеству
	Д1	Д2	МППКУ	ИУ	
1	1	1	1	1	$G_1 +$
2	1	1	1	0	G_0
3	1	1	0	1	G_0
4	1	1	0	0	G_0
5	1	0	1	1	$G_1 +$
6	1	0	1	0	G_0
7	1	0	0	1	G_0
8	1	0	0	0	G_0
9	0	1	1	1	$G_1 +$
10	0	1	1	0	G_0
11	0	1	0	1	G_0
12	0	1	0	0	G_0
13	0	0	1	1	G_0
14	0	0	1	0	G_0
15	0	0	0	1	G_0
16	0	0	0	0	G_0

Примечания: 1. В табл. 3.2 цифра «1» в символическом обозначении состояния устройства отвечает его безотказной работе, а цифра «0» – отказу устройства и, как следствие, потере работоспособности.

2. Принятые обозначения:

G_1 – подмножество состояний безотказной работы (т. е. работоспособных), состояния этого подмножества дополнительно отмечены знаком «+»; G_0 – подмножество неработоспособных состояний.

Из табл. 3.2 видно, что только три состояния рассматриваемой ЭСБ принадлежат к множеству работоспособных состояний G_1 . Это состояния под номерами 1, 5 и 9:

$$X_1 = \{1, 1, 1, 1\};$$

$$X_5 = \{1, 0, 1, 1\};$$

$$X_9 = \{0, 1, 1, 1\}.$$

При записи этих состояний приняты во внимание места устройств ЭСБ в X_i ($i = 1, 5, 9$):

$$X_i = \{x_{д1}, x_{д2}, x_{мпкку}, x_{иу}\},$$

где i – номер состояния ЭСБ в табл. 3.2.

3. Определяем вероятности состояний X_1 , X_5 и X_9 . Пользуемся формулой (3.4). По аналогии с выражением (3.6) примера 3.1 можно записать:

$$p_{x1} = r_{д1} r_{д2} r_{мпкку} r_{иу}; \quad (3.7)$$

$$p_{x5} = r_{д1} q_{д2} r_{мпкку} r_{иу}; \quad (3.8)$$

$$p_{x9} = q_{д1} r_{д2} r_{мпкку} r_{иу}, \quad (3.9)$$

где символы r и q означают вероятности безотказной работы и вероятности отказа, а по нижним индексам понятно, к каким устройствам ЭСБ относятся соответствующие вероятности.

Подставив в выражения (3.7)–(3.9) значения вероятностей, взятых из табл. 3.1, получим

$$p_{x1} = 0,85 \cdot 0,85 \cdot 0,95 \cdot 0,93 = 0,638329;$$

$$p_{x5} = 0,85 \cdot 0,15 \cdot 0,95 \cdot 0,93 = 0,112646;$$

$$p_{x9} = 0,15 \cdot 0,85 \cdot 0,95 \cdot 0,93 = 0,112646.$$

4. Используя выражение (3.2), находим вероятность безотказной работы ЭСБ:

$$R_{\text{ЭСБ}} = p_{x1} + p_{x5} + p_{x9} = 0,638329 + 0,112646 + 0,112646 = 0,863621 \approx 0,864.$$

Вероятность отказа системы

$$Q_{\text{ЭСБ}} = 1 - R_{\text{ЭСБ}} = 1 - 0,864 = 0,136.$$

3.3. Особенности учебной программы для ЭВМ

Учебная программа для ЭВМ имеет два режима: демонстрационный и проектный.

Демонстрационный режим предназначен для ознакомления с процедурой применения метода прямого перебора для определения вероятности безотказной работы ЭСБ.

Проектный режим – режим выбора исследуемой ЭСБ и определения её надёжности – используется для выполнения заданий, предлагаемых для экспериментальной части лабораторной работы. Выполнение заданий предполагает следующие этапы:

- выбор из выпадающего списка варианта структурной схемы ЭСБ;
- уточнение критерия отказа или условия работоспособности ЭСБ и определение подмножества состояний отказа или же подмножества состояний работоспособности ЭСБ в зависимости от того, какое подмножество студенту проще получить (получаемое методом перебора подмножество технических состояний ЭСБ будем называть рабочим подмножеством; нахождение состояний рабочего подмножества заметно упростится, если вначале построить структурную схему расчёта надёжности ЭСБ и воспользоваться этой схемой);
- определение ручным способом вероятности одного из состояний ЭСБ для рабочего подмножества;
- расчёт вероятности безотказной работы или вероятности отказа ЭСБ с учётом характера выбранного рабочего подмножества состояний ЭСБ.

После выполнения процедуры перебора состояний ЭСБ программа выполняет проверку правильности числа и сути указанных состояний. Для правильного выполнения процедуры перебора студенту отводится ограниченное количество попыток. Если все попытки израсходованы, но цель не достигнута, то программа завершает работу, о чём информируется также преподаватель. Повторно программа студентом не может быть запущена без ввода пароля преподавателем. Это первая особенность учебной программы для ЭВМ.

Второй особенностью программы является возможность изменения диапазона генерируемых вероятностей безотказной работы устройств ЭСБ (до выбора варианта задания студентом). Это может быть сделано преподавателем после ввода нужного пароля.

3.4. Задания на экспериментальную часть лабораторной работы

1. Ознакомиться с процедурой определения надёжности ЭСБ методом прямого перебора состояний её работоспособности, выбрав демонстрационный режим учебной программы для ЭВМ.

Для лучшего осмысливания метода при необходимости следует обратиться к примеру 3.2. После этого перейти в проектный режим.

2. Выбрать структурную схему ЭСБ в соответствии с вариантом, указанным преподавателем. Если преподавателем указано несколько вариантов, то они выполняются последовательно друг за другом.

3. Для исследуемой ЭСБ уточнить критерий отказа или условие работоспособности и построить СРН. Программа для ЭВМ проверяет правильность построенной СРН.

4. Определиться с характером подмножества, состояния которого студентом будут указываться для исследуемой ЭСБ: подмножество работоспособных состояний ЭСБ или подмножество состояний отказа ЭСБ.

5. Для состояния ЭСБ, указанного программой для ЭВМ из числа входящих в рабочее подмножество, ручным способом подсчитать вероятность этого состояния и ввести её в ЭВМ. Погрешность, с которой должен выполняться

расчёт, указывается программой для ЭВМ. В случае правильного расчёта вероятности указанного состояния будут подсчитаны ЭВМ автоматически вероятности остальных состояний ЭСБ, включённые в рабочее подмножество.

При выполнении этого пункта следует использовать вероятности безотказной работы устройств, приводимые на главном окне программы. Перед проведением расчёта рекомендуется обратиться к примеру 3.2.

6. Пользуясь СРН или (при наличии опыта) структурной схемой ЭСБ и критерием отказа или работоспособности ЭСБ, указать состояния выбранного рабочего подмножества в таблице, которую учебная программа для ЭВМ размещает на главном окне. Нажатием кнопки «Проверить» выяснить правильность выполнения этого этапа.

Данный пункт задания выполняется до тех пор, пока не появится служебное окно с информацией о правильности выполнения этапа.

7. С помощью нужной кнопки на главном окне программы дать команду на определение итогового показателя надёжности ЭСБ с учётом характера рабочего подмножества состояний ЭСБ.

8. Пользуясь СРН, построенной при выполнении п. 3, выполнить чисто аналитический расчёт надёжности исследуемой ЭСБ и результат сравнить с тем, который получен при выполнении п. 7. При расхождении результатов выяснить и объяснить причину.

3.5. Содержание отчёта

1. Формулировка цели лабораторной работы.
2. Структурная схема исследуемой ЭСБ и указание критерия её отказа или условия работоспособности.
3. Таблица вероятностей безотказной работы устройств, входящих в состав исследуемой ЭСБ.
4. Схема расчёта надёжности (СРН), построенная с учётом критерия работоспособности исследуемой ЭСБ.
5. Таблица состояний ЭСБ, включённых в рабочее подмножество: подмножество работоспособных состояний ЭСБ или подмножество состояний отказа ЭСБ. В крайнем правом столбце этой таблицы привести значения вероятностей состояний ЭСБ.
6. Значения итогового показателя надёжности, полученного методом перебора состояний ЭСБ и рассчитанного по СРН.
7. Выводы по работе.

Примечание. При наличии расхождений показателей, указанных в п. 6, объяснить возможную причину.

3.6. Контрольные вопросы

1. В каких технических состояниях могут находиться устройства, входящие в ЭСБ, и сама система в целом?

2. В чём состоит суть расчёта надёжности ЭСБ методом прямого перебора состояний её работоспособности?

3. Что представляет собой подмножество состояний работоспособности ЭСБ?

4. Как в лабораторной работе определялись состояния работоспособности или состояния отказа ЭСБ?

5. Как рассчитать вероятность состояния ЭСБ? Ответ дать с учётом подхода, который был применён в лабораторной работе.

6. Как по результатам перебора состояний, включаемых в подмножество работоспособных состояний ЭСБ, найти результирующий показатель надёжности ЭСБ?

7. Как по результатам перебора состояний, включаемых в подмножество неработоспособных состояний ЭСБ, найти результирующий показатель надёжности ЭСБ?

Литература

1. Половко, А. М. Основы теории надёжности / А. М. Половко, С. В. Гуров. – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб. : БХВ-Петербург, 2006. – 704 с.

2. Надёжность технических систем : справочник / Ю. К. Беляев [и др.] ; под ред. И. А. Ушакова. – М. : Радио и связь, 1985. – 608 с.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕРОЯТНОСТИ ЗАЩИТЫ ОБЪЕКТА МОДЕЛИРОВАНИЕМ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ И ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ УСТРОЙСТВ ЭСБ

4.1. Цель работы

Определить методом моделирования на ЭВМ вероятность обеспечения защиты объекта с помощью ЭСБ.

Примечание. Указанная вероятность определяется путём имитации возможных состояний ЭСБ и учёта коэффициентов эффективности, соответствующих этим состояниям.

4.2. Теоретические сведения

Надёжность ЭСБ, обеспечивающих защиту объектов, материальных, информационных и других ресурсов, можно описать с помощью общепринятого показателя надёжности, такого, как вероятность работоспособного состояния R , учитывающего вероятности работоспособного состояния функциональных частей, входящих в состав ЭСБ [1–3]. Обозначим указанные вероятности для этих частей через r_j , где j означает конкретную часть ЭСБ (устройство, оператор, охрана и т. п.).

Составные части ЭСБ, находясь в рабочем (нормальном) состоянии, не являются идеальными с точки зрения формирования и/или восприятия и правильной обработки сигналов о проникновении на объект нарушителя. Так, датчики ЭСБ в ряде случаев могут не сформировать сигнал о проникновении нарушителя, микропроцессорное приёмно-контрольное устройство (МППКУ) неправильно обработать поступающие от датчиков сигналы, исполнительные устройства не отреагировать на поступающие от МППКУ команды, операторы допустить пропуск видеоизображения нарушителя или не воспринять управляющие команды и т. д. Объясняется это действием на ЭСБ, её устройства и составные части климатических факторов, естественных и промышленных электрических и электромагнитных помех и т. п. Поэтому для вероятности защиты объекта с помощью ЭСБ $P_{\text{защ}}$ имеет место неравенство $P_{\text{защ}} < R$. Более полным и объективным критерием качества работы ЭСБ является показатель эффективности её функционирования (обозначим показатель через E), для которого [2, 3]

$$E = \sum_{i=1}^N h_i(t) \Phi_i, \quad (4.1)$$

где $h_i(t)$ – вероятность того, что ЭСБ в момент времени t находится в i -м состоянии;

Φ_i – коэффициент эффективности i -го состояния ЭСБ;

N – число возможных состояний ЭСБ.

Переход ЭСБ из одного состояния в другое обусловлен потерей работоспособности той или иной части ЭСБ (для устройств ЭСБ из-за возникающих неисправностей). В качестве коэффициентов эффективности Φ_i логично рассматривать вероятность обнаружения нарушителя и последующей ликвидации угрозы в случае нахождения ЭСБ в i -м состоянии. Тогда показатель E будет представлять собой вероятность защиты объекта $P_{\text{защ}}$, определяемую фактически по формуле полной вероятности [4]:

$$P(A) = \sum_{i=1}^N P(H_i)P(A|H_i), \quad (4.2)$$

где A – событие, состоящее в обеспечении защиты объекта;

H_i – события (гипотезы), состоящие в том, что ЭСБ находится в i -м состоянии;

$P(H_i)$ – вероятность нахождения ЭСБ в i -м состоянии;

$P(A|H_i)$ – вероятность защиты объекта (событие A) в случае нахождения ЭСБ в i -м состоянии.

В нашем случае

$$E = P_{\text{защ}} = P(A), \quad h_i(t) = P(H_i), \quad \Phi_i = P(A|H_i). \quad (4.3)$$

Пример 4.1. Определим вероятность защиты объекта $P_{\text{защ}}$, обеспечиваемую простейшей ЭСБ, для которой структурная схема и модель соединения устройств с точки зрения надёжности и с точки зрения обнаружения и последующей ликвидации нарушителя показаны на рис. 4.1. Условием работоспособного состояния (надёжности) ЭСБ будем считать одновременную работоспособность микропроцессорного приёмно-контрольного устройства (МППКУ) и хотя бы одного из датчиков.

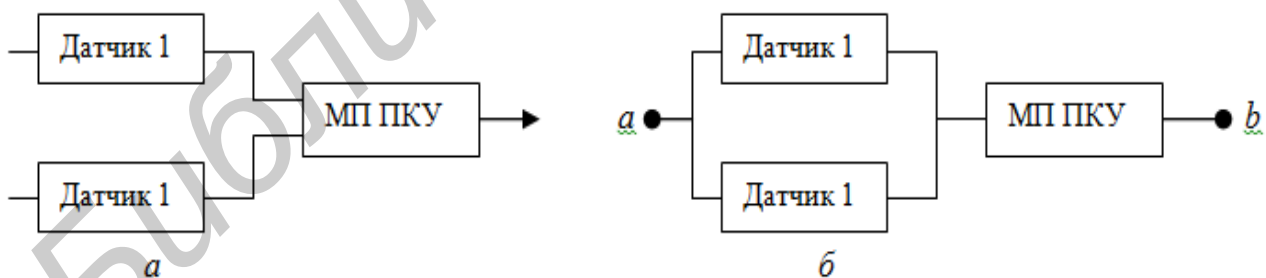


Рис. 4.1. Схемы, используемые для анализа рассматриваемой ЭСБ:

a – структурная схема ЭСБ; b – модель (схема) соединения устройств с точки зрения надёжности (работоспособности) ЭСБ и с точки зрения обнаружения нарушителя

Решение

1. Для определения вероятности i -го состояния ЭСБ используем формулу

$$h_i = s_{д1} \cdot s_{д2} \cdot s_{\text{МППКУ}}, \quad (4.4)$$

где s_j – вероятность, характеризующая техническое состояние (работоспособное или неработоспособное) j -го устройства ЭСБ; $j \rightarrow$ Д1 (датчик 1), Д2 (датчик 2), МППКУ (микропроцессорное приёмно-контрольное устройство).

В формулу (4.4) в качестве значений вероятностей s_j необходимо подставить вероятность работоспособного состояния r_j , если j -е устройство находится в работоспособном состоянии и вероятность $(1-r_j)$, если – в неработоспособном состоянии.

2. Согласно модели (рис. 4.1, б) формула расчёта коэффициента Φ_i , соответствующего i -му состоянию ЭСБ, может быть получена в виде

$$\Phi_i = [1 - (1 - p_{Д1})(1 - p_{Д2})]p_{МППКУ}, \quad (4.5)$$

где буквой p обозначены вероятности формирования и/или правильной обработки сигнала о нарушении, а по нижним индексам понятно, к какому устройству ЭСБ относится соответствующая вероятность.

При расчёте Φ_i по формуле (4.5) соответствующую вероятность p необходимо принять равной нулю, если устройство в i -м состоянии ЭСБ находится в неработоспособном состоянии.

3. В табл. 4.1 представлены вероятности технических состояний ЭСБ h_i и коэффициенты эффективности Φ_i , соответствующие этим состояниям, в предположении, что $r_{Д1} = r_{Д2} = 0,9$; $r_{МППКУ} = 0,95$.

Для вероятностей формирования и/или правильной обработки сигнала о нарушении приняты следующие значения: $p_{Д1} = p_{Д2} = 0,9$; $p_{МППКУ} = 0,99$.

Таблица 4.1

Возможные технические состояния рассматриваемой ЭСБ

Номер технического состояния ЭСБ i	Описание состояния работоспособности устройств ЭСБ			Вероятность технического состояния ЭСБ в целом $h_i(t)$	Коэффициент эффективности технического состояния Φ_i	Произведение $h_i(t)\Phi_i$
	Д1	Д2	МППКУ			
1	1	1	1	0,7695	0,9801	0,7542
2	1	1	0	0,0405	0	0
3	1	0	1	0,0855	0,891	0,0762
4	1	0	0	0,0045	0	0
5	0	1	1	0,0855	0,891	0,0762
6	0	1	0	0,0045	0	0
7	0	0	1	0,0095	0	0
8	0	0	0	0,0005	0	0

Примечание. В табл. 4.1 для технических состояний устройств ЭСБ приняты следующие обозначения: 1 – работоспособное состояние; 0 – неработоспособное состояние.

С учётом схемы (см. рис. 4.1, б) получено:

$$d_{J1,J2} = d_{J1} \cdot d_{J2} = (1 - r_{J1})(1 - r_{J2}) = (1 - 0,9)(1 - 0,9) = 0,01;$$

$$r_{D1, D2} = 1 - d_{D1, D2} = 1 - 0,01 = 0,99;$$

$$R = r_{Д1.Д2} \cdot r_{МПКУ} = 0,99 \cdot 0,95 = 0,9405,$$

где символы d и r означают вероятность отказа и вероятность работоспособного состояния (безотказной работы), а по нижним индексам понятно, к каким устройствам ЭСБ относятся указанные вероятности; нижний индекс «Д1,Д2» означает, что вероятности относятся к параллельной цепочке, включающей датчики Д1 и Д2.

Используя данные табл. 4.1 (последний столбец), по формуле (4.1) можно найти

$$E = P_{\text{заш}} = 0,7542 + 0,0762 + 0,0762 = 0,9066.$$

Из приведённых результатов видно, что $P_{\text{заш}} < R$.

4.3. Описание исследуемой ЭСБ и методические указания по её анализу

Обобщённая структурная схема ЭСБ, исследуемой в лабораторной работе, приведена на рис. 4.2.

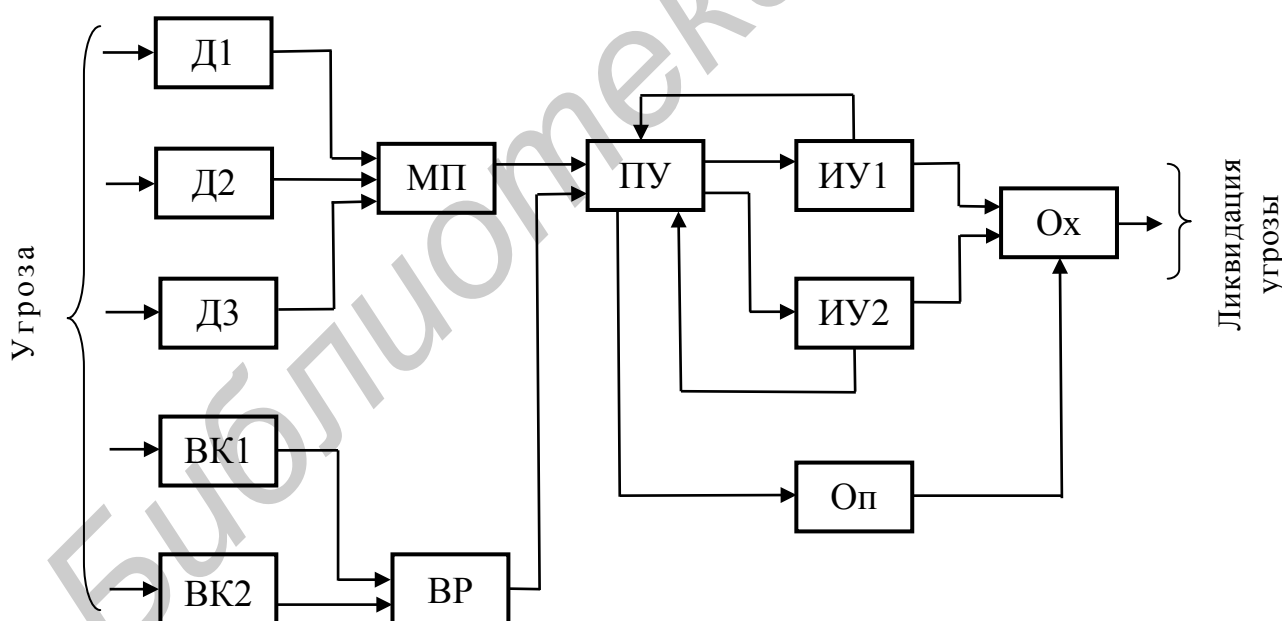


Рис. 4.2. Обобщённая структурная схема исследуемой ЭСБ:

Д1, Д2, Д3 – датчики; ВК1, ВК2 – видеокамеры; ВР – видеорегистратор;

МП – микропроцессорное приёмно-контрольное устройство; ПУ – пульт управления;

ИУ1, ИУ2 – исполнительные устройства; Оп – оператор; Ох – охрана

При формировании датчиками сигнала о проникновении на объект устройство МП обрабатывает эти сигналы и через ПУ передаёт команду на

срабатывание исполнительных устройств ИУ1 и ИУ2. Срабатывание этих устройств (ИУ1 и/или ИУ2) в случае наличия угрозы и поступления управляющих команд от МП воспринимается охраной Ох, действия которой направлены на ликвидацию угрозы. Несрабатывание обоих исполнительных устройств отображается на ПУ. В этом случае оператор Оп передаёт информацию Ох и ликвидация угрозы осуществляется её последующими действиями. При поступлении с ВР на ПУ видеоизображения нарушителя Оп даёт команду на срабатывание исполнительных устройств (если они не сработали по команде от МП) и далее действиями Ох осуществляется ликвидация угрозы.

В качестве условия работоспособности ЭСБ будем рассматривать обнаружение нарушителя хотя бы одним средством обнаружения из числа Д1, Д2, Д3, ВК1, ВК2 и устранение угрозы действиями Ох (в предположении поступления команд от ИУ1 и/или ИУ2 или от Оп).

Приведённая на рис. 4.2 схема является обобщённой. На её основе для исследований студенту предлагаются более простые ЭСБ, структурные схемы которых включают меньшее число устройств (составных частей): датчиков, видеокамер и исполнительных устройств.

Состояния h_i исследуемой ЭСБ следует определять по формуле, аналогичной (4.4), с учётом количества составных частей в системе. Оп и Ох рассматриваются как составные части ЭСБ. Общее число возможных состояний ЭСБ (обозначим через N) определится как

$$N = 2^n,$$

где n – суммарное количество составных частей ЭСБ.

Будем считать, что для ЭСБ, имеющей структурную схему в соответствии с рис. 4.2, модель (схема) соединения частей ЭСБ с точки зрения обнаружения нарушителя и ликвидации угрозы объекту имеет вид, показанный на рис. 4.3.

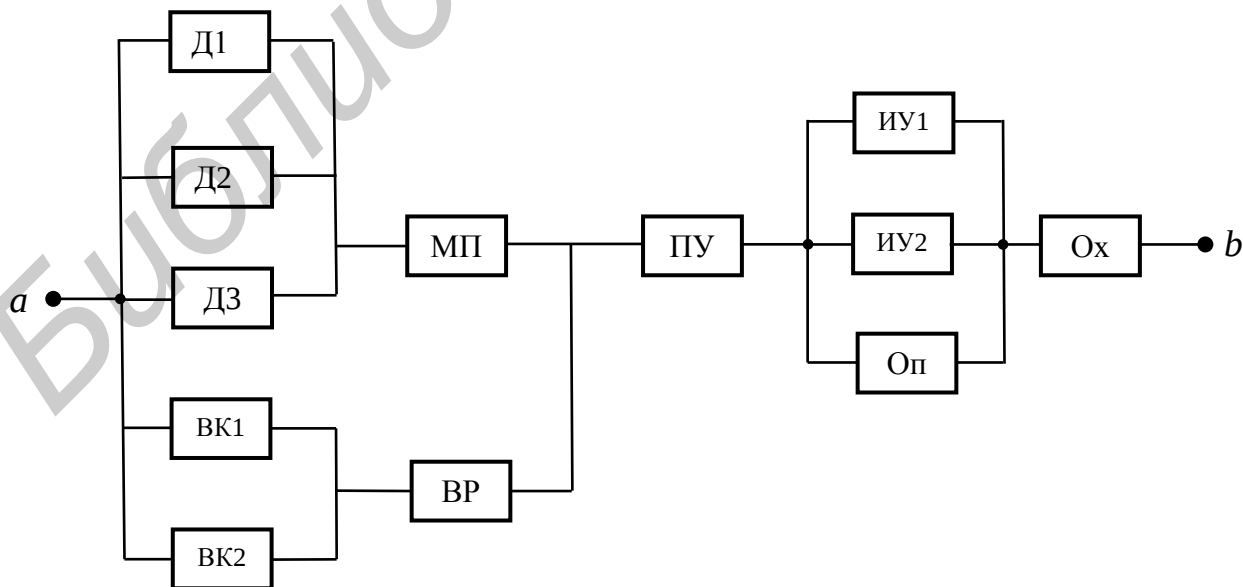


Рис. 4.3. Схема (модель) соединения частей ЭСБ с точки зрения обнаружения нарушителя и ликвидации угрозы

Используя модель (см. рис. 4.3), может быть получена формула расчёта коэффициента эффективности Φ_i , соответствующего i -му состоянию ЭСБ. Коэффициент Φ_i представляет собой вероятность (условную) обнаружения и ликвидации нарушителя системой при условии, что она находится в состоянии h_i :

$$\Phi_i = [1 - \{1 - [1 - q_{д1}q_{д2}q_{д3}]p_{мп}\}] \cdot \{1 - [1 - q_{вк1}q_{вк2}]p_{вр}\}] \times \\ \times [1 - q_{иу1}q_{иу2}q_{оп}]p_{пу}p_{ох}, \quad (4.6)$$

причём

$$\begin{aligned} q_{д1} &= 1 - p_{д1}; \\ q_{д2} &= 1 - p_{д2}; \\ q_{д3} &= 1 - p_{д3}; \\ q_{вк1} &= 1 - p_{вк1}; \\ q_{вк2} &= 1 - p_{вк2}; \\ q_{иу1} &= 1 - p_{иу1}; \\ q_{иу2} &= 1 - p_{иу2}; \\ q_{оп} &= 1 - p_{оп}; \\ q_{ох} &= 1 - p_{ох}, \end{aligned}$$

где символы p и q означают вероятности восприятия и невосприятия сигналов о проникновении нарушителя, а нижние индексы – к каким составным частям ЭСБ относятся указанные вероятности.

При расчёте Φ_i по формуле (4.6) вероятность p , соответствующую конкретной части ЭСБ, необходимо принять равной нулю, а вероятность q – равной единице, если эта часть для i -го состояния ЭСБ находится в неработоспособном состоянии.

4.4. Особенности учебной программы для ЭВМ

Особенностью программы является наличие демонстрационного и проектного режимов. В демонстрационном режиме по результатам моделирования оценивается вероятность защиты объекта с помощью ЭСБ, рассмотренной в примере 4.1. Результат сравнивается со значением, полученным расчётным способом, что отображается с помощью столбиковых диаграмм.

В проектном режиме исследуется ЭСБ, построенная на основе обобщённой схемы ЭСБ. Используя графические возможности программы, студенту предоставляется возможность построить модель (схему) соединения частей ЭСБ с точки зрения обнаружения нарушителя и ликвидации угрозы. Правильность построенной модели проверяется программой для ЭВМ.

При моделировании функционирования ЭСБ имитируются состояния работоспособности составных частей и факт восприятия или невосприятия ими сигналов об угрозе и её ликвидации. С учётом этого имитируемые угрозы (попытки) проникновения на объект либо ликвидируются исследуемой ЭСБ, либо в некоторых случаях системе сделать это не удаётся. По результатам моделирования вероятность защиты объекта $P_{\text{защ}}$ оценивается с использованием классического подхода определения вероятностей событий по экспериментальным данным:

$$P_{\text{защ}} = \frac{N_{\text{непрон}}}{N_{\text{попыт}}}, \quad (4.7)$$

где $N_{\text{непрон}}$ – число непроникновений, т. е. число угроз, которые системе удалось ликвидировать;

$N_{\text{попыт}}$ – общее число попыток проникновения, т. е. общее число угроз для объекта.

Особенностью программы также является возможность просмотра архива проникновений на объект, т. е. тех попыток, для которых системе не удалось ликвидировать угрозу.

4.5. Задания на экспериментальную часть лабораторной работы

1. Изучить структурную схему обобщённой ЭСБ (см. рис. 4.2).
2. Уточнить условие работоспособности обобщённой ЭСБ и осмыслить модель (схему) соединения её функциональных частей с точки зрения обнаружения нарушителя и ликвидации угрозы.
3. Используя программу для ЭВМ, получить вариант структурной схемы исследуемой ЭСБ и осмыслить схему.
4. С учётом числа функциональных частей ЭСБ получить формулу, аналогичную (4.4), определения вероятности состояния h_i исследуемой ЭСБ. При этом части Оп и Ох, входящие в состав ЭСБ, должны быть учтены в формуле подсчёта вероятности h_i .
5. Уточнить условие работоспособности исследуемой ЭСБ и, принимая во внимание выполненное задание 2, построить для неё модель (схему) соединения функциональных частей с точки зрения обнаружения нарушителя и ликвидации угрозы.
6. Используя модель, полученную при выполнении задания 5, а также формулу (4.6), записанную для обобщённой ЭСБ, получить выражение для расчёта коэффициента эффективности Φ_i , соответствующего состоянию h_i исследуемой ЭСБ.
7. Получить таблицу технических состояний исследуемой ЭСБ и для состояния, указанного ЭВМ, подсчитать вероятность h_i этого состояния и коэффициент эффективности Φ_i этого состояния. Для выполнения расчётов используются формулы, полученные при выполнении заданий 4 и 6.

Ввести полученные значения h_i и Φ_i в ЭВМ. В случае правильного расчёта значения h_i и Φ_i для остальных состояний ЭСБ будут подсчитаны ЭВМ автоматически. В крайнем правом столбце таблицы будут записаны произведения вида $h_i \cdot \Phi_i$.

8. Используя нужную кнопку на главном окне программы, получить для исследуемой ЭСБ значение показателя эффективности функционирования E , представляющего собой вероятность защиты объекта $P_{\text{защ}}$ с помощью исследуемой ЭСБ. Расчёт выполняется по формуле (4.1).

9. Используя режим **Моделирование**, выполнить имитацию не менее 500...1000 попыток проникновений на объект и по результатам реагирования ЭСБ на эти попытки получить экспериментальное значение вероятности защиты объекта $P_{\text{защ}}$. Просмотреть архив проникновений и выяснить, в связи с чем не была обеспечена защита объекта в той или иной попытке.

10. Сравнить значение $P_{\text{защ}}$, найденное расчётом, со значением, полученным с помощью вычислительного эксперимента, включающего имитацию проникновений и функционирование ЭСБ по обнаружению и устранению угроз объекту. Объяснить возможное расхождение результатов.

Примечания: 1. При выполнении заданий 4 и 6 использовать значения характеристик r_j и p_j , указанные в табл. 4.2.

2. Преподавателем могут быть предложены для ввода в ЭВМ значения вероятностей, отличающихся от приводимых в табл. 4.2.

Таблица 4.2

Значения вероятностей для выполнения заданий 4 и 6

Обозначение вероятности	Значение вероятности для функциональной части ЭСБ							
	Д1, Д2, Д3	ВК1, ВК2	ВР	МППКУ	ПУ	ИУ1, ИУ2	Оп	Ох
r_j	0,85	0,85	0,92	0,95	0,95	0,93	1	1
p_j	0,95	0,92	0,97	0,99	0,98	0,97	0,995	0,995

4.6. Содержание отчёта

1. Формулировка цели лабораторной работы.
2. Структурная схема исследуемой ЭСБ.
3. Модель (схема) соединения функциональных частей исследуемой ЭСБ с точки зрения обнаружения нарушителя и ликвидации угрозы для объекта.
4. Полученные формулы расчёта вероятности i -го состояния ЭСБ h_i и коэффициента эффективности Φ_i , соответствующего этому состоянию.
5. Таблица с указанием используемых вероятностей r_j и p_j для всех функциональных частей, входящих в состав исследуемой ЭСБ.
6. «Шапка» таблицы и строка, соответствующая i -му состоянию ЭСБ, для которого рассчитывались характеристики h_i и Φ_i с указанием состояния работоспособности функциональных частей ЭСБ и рассчитанных значений h_i и Φ_i .
7. Расчётное и экспериментальное (по результатам вычислительного эксперимента) значения вероятности защиты объекта $P_{\text{защ}}$, обеспечиваемые с по-

мощью исследуемой ЭСБ. Объяснение причин возможного расхождения значений вероятностей.

8. Рекомендации по повышению вероятности $P_{\text{защ}}$ (т. е. эффективности функционирования ЭСБ), не вызывающей заметного увеличения общей стоимости системы.

4.7. Контрольные вопросы

1. Чем объясняется то, что вероятность защиты объекта с помощью ЭСБ оказывается всегда меньше вероятности её работоспособного состояния?

2. Чем объясняется то, что датчики ЭСБ в ряде случаев могут не сформировать сигнал о проникновении нарушителя, микропроцессорное приёмно-контрольное устройство неправильно обработать поступающие от датчиков сигналы, исполнительные устройства не отреагировать на поступающие сигналы от других устройств ЭСБ и т. д.?

3. Объясните, почему показатель эффективности функционирования ЭСБ, определяемый по формуле (4.1), фактически есть вероятность защиты объекта с помощью данной ЭСБ.

4. Чем определяется состояние ЭСБ (от чего оно зависит)?

5. Как рассчитывается вероятность возможного состояния ЭСБ? Ответ дать с учётом расчёта, выполняемого в лабораторной работе.

6. Что понимают под коэффициентами эффективности, соответствующими состояниям ЭСБ, и что рассматривалось в качестве этих коэффициентов для ЭСБ, исследуемой в лабораторной работе?

7. Как принимались во внимание вероятности неработоспособного состояния функциональных частей ЭСБ при определении коэффициентов эффективности, соответствующих состояниям ЭСБ? Ответ дать с учётом расчёта, выполняемого при проведении лабораторной работы.

Литература

1. Боровиков, С. М. Теоретические основы конструирования, технологии и надёжности : учебник для инж.-техн. спец. вузов / С. М. Боровиков. – Минск : Дизайн ПРО, 1998. – 336 с.

2. Надёжность технических систем : справочник / Ю. К. Беляев [и др.]; под ред. И. А. Ушакова. – М. : Радио и связь, 1985. – 608 с.

3. Половко, А. М. Основы теории надёжности / А. М. Половко, С. В. Гуров. – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб. : БХВ-Петербург, 2006. – 704.

4. Вентцель, Е. С. Теория вероятностей : учебник / Е. С. Вентцель. – 9-е изд., стереотип. – М. : Академия, 2003. – 576 с.

5. Чулков, Н. А. Надёжность технических систем и техногенный риск : учеб. пособие / Н. А. Чулков, А. Н. Деренок. – Томск : Изд-во Томск. политехн. ун-та, 2012. – 150 с.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №5

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАДЁЖНОСТИ ЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМЫ БЕЗОПАСНОСТИ МЕТОДОМ ПОСТРОЕНИЯ ДЕРЕВА ОТКАЗОВ

5.1. Цель работы

Построение дерева отказов электронной системы безопасности и определение показателя надёжности, основываясь на структурной схеме ЭСБ, условии её работоспособности или критерия отказа и справочных данных о надёжности устройств, входящих в состав ЭСБ.

5.2. Теоретические сведения

Метод анализа дерева отказов (fault tree analysis – FTA) впервые был использован в 1962 г. компанией Bell Labs для Военно-воздушных сил США. В настоящее время метод широко применяется для анализа причин отказов статических систем. Данный метод является частью национальных стандартов, таких, например, как стандарт США «MIL-HDBK-217 Reliability prediction of electronic equipment» или российский РД 03-418-01 «Методические указания по проведению анализа риска опасных производственных объектов».

Дерево отказов лежит в основе логико-вероятностной модели причинно-следственных связей отказов системы с отказами её составных частей и событиями, порождающими отказ. Для анализа возникновения отказа дерево отказов строится из последовательностей и комбинаций нарушений работоспособности или отказов, и таким образом оно представляет собой многоуровневую графологическую структуру причинных взаимосвязей, полученных в результате прослеживания опасных ситуаций в обратном порядке для того, чтобы отыскать возможные причины их возникновения. Обобщённая структурная схема построения дерева отказов показана на рис. 5.1.

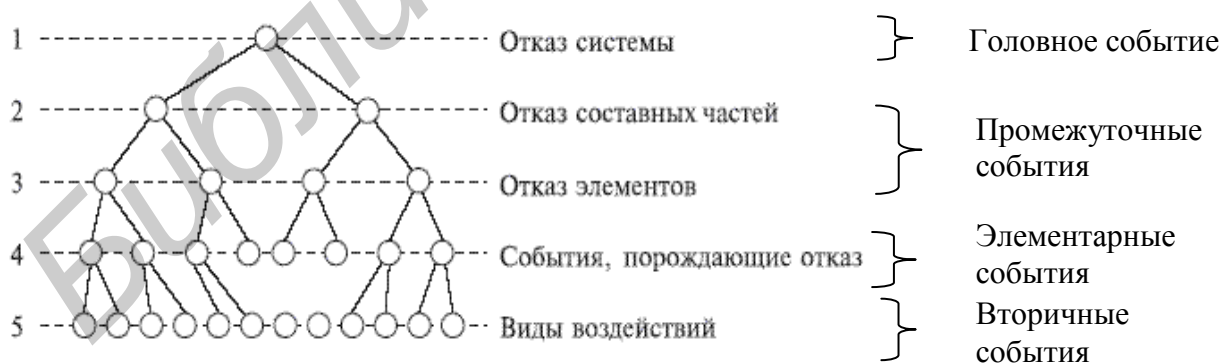


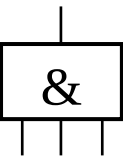
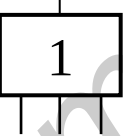
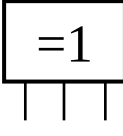
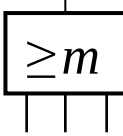
Рис. 5.1. Условная схема построения дерева отказов

Анализ причин, из-за которых ЭСБ не выполняет требуемые функции, показывает, что это объясняется комбинацией случайных событий, возникающих с различной частотой на разных стадиях применения ЭСБ. Такими событиями могут быть: отказ устройства ЭСБ ввиду возникновения неисправности,

невосприятие угрозы датчиком, неправильная обработка сигналов приёмно-контрольным устройством (ПКУ) из-за сбоя программного обеспечения, несрабатывание исполнительного устройства, ошибка оператора при использовании системы по назначению, внешнее воздействие и т. д. Для выявления причинно-следственных связей между этими событиями можно применить логико-графические методы деревьев отказов и событий. Дерево отказов лежит в основе словесно-графического способа анализа возникновения различного рода событий, трактуемых как предпосылки к невыполнению ЭСБ требуемых функций по защите объекта. Указанные события образуют определённую последовательность и комбинацию. Для наглядного изображения таких событий используют ряд символов – графических изображений (табл. 5.1).

Таблица 5.1

Значение логических символов дерева отказов

Номер символа	Символ логического знака в системе FTA	Символ логического знака, используемый в отечественной электронике	Название логического знака	Суть символа (причинная взаимосвязь)
1			И	Выходное событие происходит, если все входные события случаются одновременно
2			ИЛИ	Выходное событие происходит, если случается хотя бы одно из входных событий
3		—	ЗАПРЕТ	Наличие входа вызывает наличие выхода тогда, когда происходит условное событие
4		—	Приоритетное И	Выходное событие случается, если все входные события происходят в нужном порядке слева направо
5			Исключающее ИЛИ	Выходное событие случается, если случается одно (но только одно) из входных событий
6			"m из n" (голосования или выборы)	Выходное событие случается, если случается m из n входных событий

Под событием можно понимать любое происшествие или ситуацию, которые могут произойти в реальной жизни. При анализе надёжности и эффективности функционирования ЭСБ её отказ в виде невыполнения предписанных ей функций по защите объекта обычно выделяют как головное (иначе, конечное) событие, которое располагается в вершине дерева. Этому конечному событию предшествуют другие события.

Задача заключается в том, чтобы выявить путём обратной логики причинно-следственную связь между событиями, предшествующими возникновению головного события. События, непосредственно предшествующие головному событию, будем называть промежуточными. Некоторые авторы [1] условно называют их основными.

Последовательности событий в дереве отказов организуют с помощью символов логических операций, из которых наиболее часто используются операции И и ИЛИ. Операция И указывает на то, что для получения выходного события необходимы все события на входе. Операция ИЛИ означает, что для получения выходного события должно произойти хотя бы одно событие на входе.

Используя построение дерева отказов, моделирование отказа ЭСБ в виде невыполнения предписанных ей функций, выполняют поэтапно:

1. Выделяют элементарные события, а при необходимости и вторичные, обусловленные внешними и внутренними воздействиями.
2. Нежелательные события разделяют на группы, причём группы формируют по некоторым общим признакам.
3. Выделяют головное событие, к которому приводят все события каждой группы.
4. Определяют все промежуточные события, которые могут вызвать появление головного события.
5. Определяют взаимосвязь между событиями в терминах логических операций (см. табл. 5.1).
6. Продолжают этапы 4, 5 до тех пор, пока все промежуточные события не будут выявлены, либо прекращают проведение анализа из-за незначительности влияния других промежуточных событий или отсутствия данных.
7. Представляют события и их связь в графическом виде, т. е. строят дерево отказов.

Пример 5.1. Построим дерево отказов для анализа ЭСБ, структурная схема которой показана на рис. 5.2.

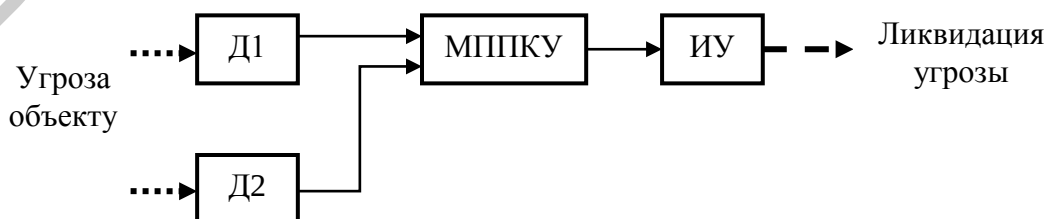


Рис. 5.2. Структурная схема ЭСБ

Будем считать, что ЭСБ способна выполнить функцию по защите объекта в случаях, если угрозу о проникновении на объект воспримет хотя бы один из датчиков (Д1 или Д2), а исполнительное устройство ИУ ликвидирует угрозу по команде, поступающей от микропроцессорного приёмно-контрольного устройства МППКУ.

Решение

1. Выделяем исходные (элементарные) события, которые могут привести к невыполнению ЭСБ предписанных функций по защите объекта. В качестве первой группы таких событий можно выделить возникновение технических неисправностей в устройствах, входящих в состав ЭСБ, и, следовательно, их отказ. Вторую группу составляют такие нежелательные события (отказы), которые могут иметь место для устройств ЭСБ даже в случае их исправного технического состояния: невосприятие угрозы датчиками, неправильная обработка МППКУ сигналов, несрабатывание исполнительного устройства в случае поступления команды на ликвидацию угрозы, например из-за сбоя программного обеспечения ИУ и т.д.

Пусть для устройств ЭСБ информация о вероятностях работоспособного состояния r_j и вероятностях восприятия и/или правильной обработки сигналов об угрозе объекту p_j соответствует данным табл. 5.2. Для простоты построения дерева отказов примем, что для МППКУ вероятность $p_{\text{МППКУ}} = 1$.

Таблица 5.2

Информация о качественных характеристиках устройств ЭСБ

Обозначение вероятности	Значение вероятности для устройства ЭСБ			
	Д1	Д2	МППКУ	ИУ
r_j	0,85	0,85	0,95	0,93
p_j	0,90	0,90	1,00	0,97

2. Элементарные события разделяем на группы. Удобно группы таких нежелательных событий выделить в зависимости от вида устройств ЭСБ: события, связанные с датчиками; события, связанные с МППКУ; события, связанные с ИУ.

3. Выделяем одно головное событие, к которому приводятся события каждой группы. Таким событием является отказ ЭСБ в виде невыполнения системой предписанных функций по защите объекта.

4. Выявляем последовательности опасных событий, предшествующие появлению головного события, для чего определяем следующее:

- все промежуточные события, которые могут вызвать головное событие;
- отношения между событиями в терминах логических операций И и ИЛИ.

5. Представляем события в графическом виде, в итоге получаем дерево отказов (рис. 5.3).

Пояснение событий, указанных на рис. 5.3, приводится в табл. 5.3.

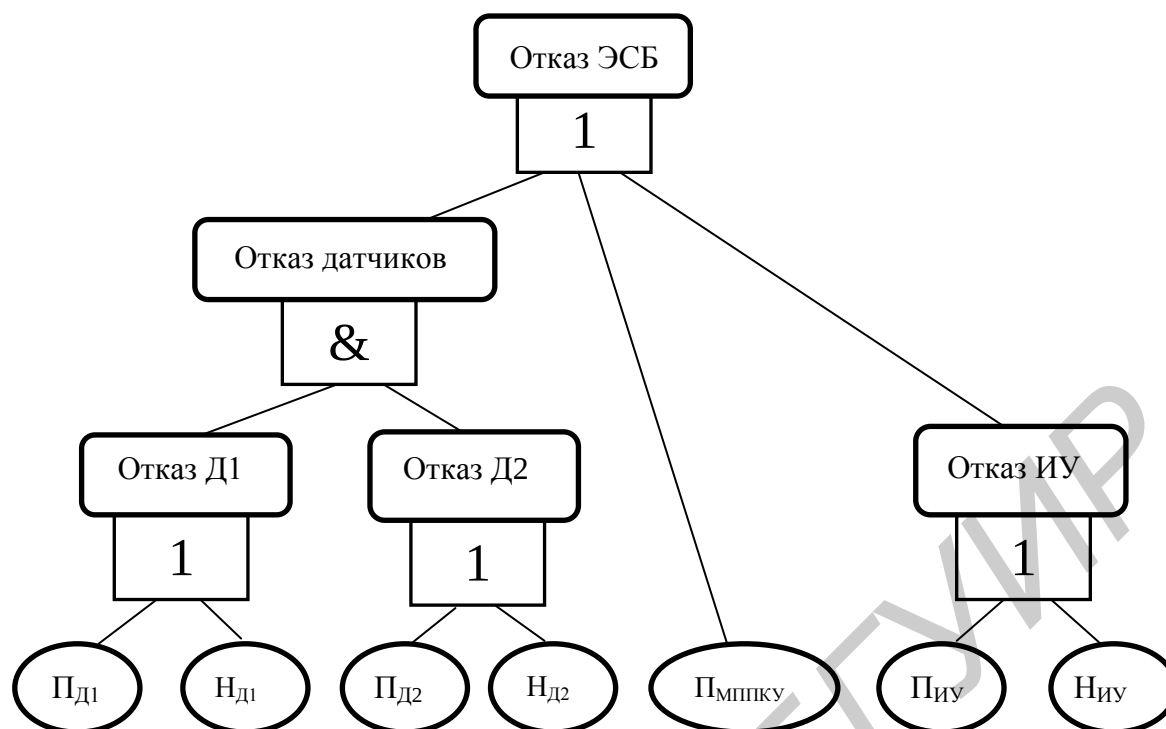


Рис. 5.3. Дерево отказов рассматриваемой ЭСБ

Таблица 5.3

Пояснение событий дерева отказов

Обозначение события на рис. 5.3	Смысл события	Примечание
П _{д1}	Отказ в виде полной потери работоспособности Д1 из-за возникшей неисправности	Исходное событие
Н _{д1}	Отказ в виде невосприятия нарушителя технически исправным датчиком Д1	Исходное событие
П _{д2}	Отказ в виде полной потери работоспособности Д2 из-за возникшей неисправности	Исходное событие
Н _{д2}	Отказ в виде невосприятия нарушителя технически исправным датчиком Д2	Исходное событие
П _{мппку}	Отказ в виде полной потери работоспособности МППКУ из-за возникшей неисправности	Исходное событие
Пиу	Отказ в виде полной потери работоспособности ИУ из-за возникшей неисправности	Исходное событие
Ниу	Отказ в виде невосприятия команды на ликвидацию угрозы технически исправным ИУ	Исходное событие
Отказ Д1	Невыполнение Д1 возлагаемой на него функции	Промежуточное событие
Отказ Д2	Невыполнение Д2 возлагаемой на него функции	Промежуточное событие
Отказ ИУ	Невыполнение ИУ возлагаемой на него функции	Промежуточное событие
Отказ датчиков	Невыполнение совокупностью датчиков (Д1 и Д2) функции по восприятию нарушителя	Промежуточное событие
Отказ ЭСБ	Невыполнение ЭСБ предписанных функций по защите объекта	Головное событие

Пользуясь деревом отказов, удобно выполнять вероятностную оценку промежуточным событиям и легко найти вероятность головного события.

Для логической схемы ИЛИ с двумя входами вероятность появления завершающего события (обозначим через T) определяется по формуле

$$P(T) = P(A) + P(B) - P(A \cdot B), \quad (5.1)$$

где A, B – события на входе логической схемы;

$P(A), P(B)$ – вероятности событий A и B ;

$P(A \cdot B)$ – вероятность произведения событий A и B .

В случае схемы ИЛИ с n входами и событиями A_i на входах ($i = 1, 2, \dots, n$) можно воспользоваться формулой, приведённой в [4], но проще от событий A_i перейти к противоположным событиям $\bar{A}_i$ и воспользоваться формулой

$$P(T) = 1 - \prod_{i=1}^n P(\bar{A}_i), \quad (5.2)$$

где $P(\bar{A}_i)$ – вероятность события $\bar{A}_i$, противоположного событию A_i :

$$P(\bar{A}_i) = 1 - P(A_i). \quad (5.3)$$

Для логической схемы И с n входами и событиями A_i на входах ($i = 1, 2, \dots, n$) применяется правило умножения вероятностей:

$$P(T) = P(A_1 A_2 \dots A_n) = P(A_1) \cdot P(A_2) \dots P(A_n) = \prod_{i=1}^n P(A_i). \quad (5.4)$$

Покажем примером, как выполняется вероятностная оценка событий.

Пример 5.2. Пользуясь деревом отказов (см. рис. 5.3), построенным в примере 5.1, выполним вероятностную оценку применительно к промежуточным и головному событиям. Будем считать, что для устройств ЭСБ информация о вероятностях безотказной работы r_j и вероятностях восприятия и/или правильной обработки сигнала об угрозе объекту p_j соответствует данным табл. 5.2.

Решение

1. В качестве исходных событий для дерева отказов рассматриваются отказы, обусловленные потерей работоспособности устройств ЭСБ из-за технических неисправностей, и отказы из-за невосприятия нарушителя или команд устройствами, находящимися в исправном техническом состоянии.

Определим вероятности исходных событий. Для вероятности появления отказа из-за возникшей неисправности j -го устройства d_j и вероятности невосприятия нарушителя или команды j -м устройством q_j справедливы выражения

$$\begin{aligned} d_j &= 1 - r_j, \\ q_j &= 1 - p_j. \end{aligned} \quad (5.5)$$

С учётом выражений (5.5) и данных табл. 5.2 для всех устройств ЭСБ получены значения вероятностей d_j и q_j , используемые для вероятностной оценки событий дерева отказов (табл. 5.4).

Таблица 5.4

Данные для вероятностной оценки событий дерева отказов

Обозначение вероятности	Значение вероятности для устройства ЭСБ			
	Д1	Д2	МППКУ	ИУ
d_j	0,15	0,15	0,05	0,07
q_j	0,1	0,1	0,00	0,03

2. Рассчитываем вероятности событий «Отказ Д1», «Отказ Д2» и «Отказ ИУ», для которых с учётом схемы ИЛИ в случае двух входов воспользуемся формулой (5.1). Принимая во внимание, что

$$P(\Pi_{Д1}) = d_{Д1};$$

$$P(H_{Д1}) = q_{Д1};$$

$$P(\Pi_{Д2}) = d_{Д2};$$

$$P(H_{Д2}) = q_{Д2};$$

$$P(\Pi_{ИУ}) = d_{ИУ};$$

$$P(H_{ИУ}) = q_{ИУ},$$

получим

$$\begin{aligned} P(\text{Отказ Д1}) &= P(\Pi_{Д1}) + P(H_{Д1}) - P(\Pi_{Д1}) \cdot P(H_{Д1}) = d_{Д1} + q_{Д1} - d_{Д1} \cdot q_{Д1} = \\ &= 0,15 + 0,1 - 0,15 \cdot 0,1 = 0,235; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P(\text{Отказ Д2}) &= P(\Pi_{Д2}) + P(H_{Д2}) - P(\Pi_{Д2}) \cdot P(H_{Д2}) = d_{Д2} + q_{Д2} - d_{Д2} \cdot q_{Д2} = \\ &= 0,15 + 0,1 - 0,15 \cdot 0,1 = 0,235; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P(\text{Отказ ИУ}) &= P(\Pi_{ИУ}) + P(H_{ИУ}) - P(\Pi_{ИУ}) \cdot P(H_{ИУ}) = d_{ИУ} + q_{ИУ} - d_{ИУ} \cdot q_{ИУ} = \\ &= 0,07 + 0,03 - 0,07 \cdot 0,03 = 0,0979, \end{aligned}$$

где символ P (здесь и далее) означает вероятность события, указанного в скобках, а нижние индексы – к каким устройствам относятся соответствующие события (см. табл. 5.3) или вероятности d и q .

3. Находим вероятность события «Отказ датчиков». Используем формулу (5.4) с учётом того, что в данном случае $n = 2$, т. к. на входе логической схемы И (см. рис. 5.3) два события: «Отказ Д1» и «Отказ Д2». Получим

$$P(\text{Отказ датчиков}) = P(\text{Отказ Д1}) \cdot P(\text{Отказ Д2}) = 0,235 \cdot 0,235 = 0,055225.$$

4. Находим вероятность события «Отказ МППКУ». По условию примера 5.1 для МППКУ вероятность правильной обработки сигналов $p_{\text{МППКУ}} = 1$, поэтому отказы МППКУ обусловлены только потерей работоспособности из-за возникающих неисправностей. Следовательно, можно записать

$$P(\text{Отказ МППКУ}) = P(\Pi_{\text{МППКУ}}) = d_{\text{МППКУ}} = 0,05.$$

5. Определяем вероятность головного события «Отказ ЭСБ», являющегося результирующим для схемы ИЛИ, на входе которой три события: «Отказ датчиков», «Отказ МППКУ», «Отказ ИУ». Интересующую вероятность вычисляем по формуле (5.2), для чего вначале найдём вероятности событий, противоположные событиям «Отказ датчиков», «Отказ МППКУ», «Отказ ИУ». Противоположные события обозначим соответственно через a , b и c . Для вероятностей этих событий получим

$$P(a) = 1 - P(\text{Отказ датчиков}) = 1 - 0,055225 = 0,944775;$$

$$P(b) = 1 - P(\text{Отказ МППКУ}) = 1 - 0,05 = 0,95;$$

$$P(c) = 1 - P(\text{Отказ ИУ}) = 1 - 0,0979 = 0,9021.$$

По формуле (5.2) определяем вероятность головного события «Отказ ЭСБ»:

$$P(\text{Отказ ЭСБ}) = 1 - P(a) \cdot P(b) \cdot P(c) = 1 - 0,944775 \cdot 0,95 \cdot 0,9021 \approx 0,19.$$

Отметим, что полученное число характеризует возможность возникновения отказов ЭСБ, обусловленных как возникновением технических неисправностей устройств, входящих в состав системы, так и невыполнением устройствами, находящимся в исправном техническом состоянии, своих функций ввиду различных причин: действие климатических факторов, промышленные и естественные электромагнитные помехи и др.

5.3. Особенности учебной программы для ЭВМ

Программа для ЭВМ имеет два режима работы: демонстрационный и проектный. Демонстрационный режим предназначен для ознакомления

студентов с принципами построения дерева отказов на примере ЭСБ, рассмотренной в подразд. 5.2.

Проектный режим предназначен для определения причинно-следственных связей отказов ЭСБ с отказами её составных частей (устройств) и для графического отображения этих связей в виде дерева отказов. Здесь характер общения студента с ЭВМ – диалоговый. В этом режиме, используя графические возможности программы для ЭВМ, студент строит дерево отказов. При этом у него имеются широкие возможности редактирования дерева отказов: перемещения частей дерева (исходных событий, логических символов и связанных с ними фактов появления головного события или промежуточных), внесения изменений, правок и т. п.

Программа позволяет сделать ввод вероятностей элементарных (исходных) событий и по построенному дереву отказов рассчитать вероятность возникновения головного события – отказа ЭСБ в виде невыполнения функций по защите объекта. Для справки указываются и вероятности промежуточных событий. Предусмотрено сохранение построенного дерева отказов в графическом и табличном виде. Назначение кнопок на главном окне программы интуитивно понятно. Соединения на дереве отказов следует выполнять от событий к логическим символам. С «работой» логического символа связано определённое событие, которое для наглядности совмещено с самим логическим символом и размещено сверху от него.

Внимание: программа разработана так, что имеется возможность строить как дерево отказов, так и дерево работоспособности ЭСБ в виде выполнения ею предписанных функций по защите объекта. Для этого необходимо выбрать нужный формат (способ) построения дерева (кнопка Р). Все возможности программы в одинаковой степени относятся и к этому формату построения дерева. Описание лабораторной работы ориентировано на выбор формата построения дерева отказов.

5.4. Задания на экспериментальную часть лабораторной работы

1. Выбрать демонстрационный режим построения дерева отказов и ознакомиться с принципами его построения. Для лучшего понимания построения дерева отказов следует обратиться к примеру 5.1.

2. Выбрать проектный режим и указать формат построения дерева событий: построение дерева отказов или дерева работоспособных состояний. По умолчанию выбирается первый формат и все дальнейшие пункты задания описаны для этого формата.

Второй формат используется только по указанию преподавателя.

3. Получить на экране структурную схему ЭСБ, уточнить и осмыслить критерий отказа и/или работоспособности системы с точки зрения обеспечения защиты объекта.

4. Определить элементарные (исходные) события и разделить их на группы по признаку связанности с устройством ЭСБ. Используя возможности программы для ЭВМ, нанести эти события на рабочее поле главного окна программы. Нажатием правой клавиши мыши войти в режим редактирования, присвоить и ввести обозначения элементарным событиям.

5. Осмыслить головное событие дерева отказов. В лабораторной работе таким событием является отказ ЭСБ в виде невыполнения ею предписанных функций по обеспечению защиты объекта.

6. Определить все промежуточные события, которые могут вызвать появление головного события и нанести их на рабочее поле. При этом обязательно учесть, что промежуточное событие возникает после «срабатывания» соответствующего логического символа: И либо ИЛИ. Поэтому при построении дерева отказов промежуточные события следует брать с нужным логическим символом в зависимости от того, в каком случае эти события могут произойти.

7. Выяснить, с каким логическим символом связано головное событие, выбрать нужный вид изображения этого события и нанести на рабочее поле.

8. Проставить нужные причинно-следственные связи и получить окончательный вид дерева отказов. Следует помнить, что соединения на дереве отказов следует выполнять от событий к логическим символам.

Примечание. Причинно-следственные связи между событиями можно проставлять необязательно после нанесения на рабочее поле всех событий, а по мере нанесения исходных и части промежуточных событий, и уточнения причинно-следственных связей между ними.

9. Используя построенное дерево отказов, определить вероятность отказа ЭСБ. Для этого необходимо уточнить вероятности исходных (элементарных) событий, с помощью правой клавиши мыши войти в режим редактирования этих событий и ввести вероятности в ЭВМ, а затем с помощью нужной кнопки на главном окне программы дать команду на выполнение расчёта.

10. Осмыслить полученное значение вероятности отказа ЭСБ.

11. Сохранить результаты построения и анализа дерева отказов на электронный носитель для дальнейшего домашнего рассмотрения.

12. Выполнить вероятностную оценку событий построенного дерева по аналогии с примером 5.2. Этот пункт задания может выполняться вне учебного занятия.

5.5. Содержание отчёта

1. Формулировка цели лабораторной работы.
2. Структурная схема исследуемой ЭСБ и описание критерия её работоспособности и/или критерия её отказа.
3. Построенное дерево отказов.
4. Таблица, поясняющая обозначения и суть всех событий дерева отказов.
5. Таблица с описанием элементарных (исходных) событий и значениями их вероятностей.

6. Результаты вероятностной оценки событий дерева отказов, сведённые в таблицу.

7. Значения итогового показателя надёжности – вероятности отказа, полученного путём расчёта с использованием дерева отказов. Этот результат рекомендуется включить в таблицу, приводимую в п. 6.

8. Выводы по работе.

5.6. Контрольные вопросы

1. Что понимают под деревом отказов и какие задачи оно позволяет решать?

2. Каковы принципы построения дерева отказов?

3. Что понимают под головным, промежуточными и элементарными (исходными) событиями при построении дерева отказов?

4. Какие логические символы используют для организации последовательности событий в дереве отказов?

5. В чём состоит суть логических символов И и ИЛИ в случае их использования для построения дерева отказов? Ответ дать применительно к дереву отказов исследуемой ЭСБ.

6. Объясните причинно-следственные связи между событиями в дереве отказов ЭСБ, исследуемой в лабораторной работе.

7. Приведите формулу расчёта вероятности возникновения события, являющегося результатом «работы» логического символа И в применении к построению дерева отказов ЭСБ, поясните смысл формулы и параметров, входящих в неё.

8. Приведите формулу расчёта вероятности возникновения события, являющегося результатом «работы» логического символа ИЛИ в применении к построению дерева отказов ЭСБ, поясните смысл формулы и параметров, входящих в неё.

9. Укажите основные недостатки и ограничения анализа надёжности ЭСБ по дереву отказов. Ответ следует подготовить, используя приведённую учебную литературу [1–3] и/или Интернет-ресурсы.

Литература

1. Хенли, Е. Дж. Надёжность технических систем и оценка риска / Е. Дж. Хенли, Х. Кумамото ; пер. с англ. – М. : Машиностроение, 1984. – 528 с.

2. Половко, А. М. Основы теории надёжности / А. М. Половко, С. В. Гуров. – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб. : БХВ-Петербург, 2006. – 704.

3. Чулков, Н. А. Надёжность технических систем и техногенный риск : учеб. пособие / Н. А. Чулков, А. Н. Деренок. – Томск : Изд-во Томск. политехн. ун-та, 2012. – 150 с.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №6

ОТБОР ТРАНЗИСТОРОВ ПОВЫШЕННОГО УРОВНЯ НАДЁЖНОСТИ МЕТОДОМ ИНДИВИДУАЛЬНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ

6.1. Цель работы

Обучение будущих специалистов применению методов индивидуального прогнозирования для отбора элементов повышенного уровня надёжности.

Для достижения цели лабораторная работа предусматривает общее знакомство с индивидуальным прогнозированием надёжности (технического состояния) элементов и РЭУ; изучение метода индивидуального прогнозирования, основанного на принципах пороговой (мажоритарной) логики; решение задачи индивидуального прогнозирования надёжности транзисторов методом пороговой логики с использованием результатов обучающего эксперимента, смоделированного на ЭВМ.

6.2. Теоретические сведения

6.2.1. Индивидуальное прогнозирование надёжности элементов и РЭУ методом распознавания образов. Общие сведения

Средние статистические (вероятностные) показатели надёжности характеризуют надёжность в целой партии однотипных изделий. Действительные значения показателей надёжности для разных экземпляров могут существенно отличаться от средних значений.

В процессе сборки ответственных устройств РЭУ возникают задачи отбора элементов повышенного уровня надёжности. Для решения этих задач пригодны методы индивидуального прогнозирования, основанные на распознавании образов. Они базируются на использовании вероятностных связей между значениями электрических параметров элементов и уровнем их надёжности. Электрические параметры, несущие информацию о надёжности изделий, называют информативными параметрами, или, кратко, признаками. Поэтому индивидуальное прогнозирование на основе распознавания образов называют также прогнозированием по признакам.

Для элементов и устройств индивидуальное прогнозирование с использованием одного признака малоэффективно. На практике приходится использовать совокупность признаков $x_1, \dots, x_k$, состоящую из k признаков. Измерение k признаков j -го экземпляра образует образ этого экземпляра $x_1^{(j)}, \dots, x_k^{(j)}$, где j означает конкретный экземпляр. Задача индивидуального прогнозирования состоит в том, чтобы правильно распознать этот образ с точки зрения надёжности.

Методы на основе распознавания образов позволяют по результатам измерения признаков предсказать надёжность конкретного экземпляра до некоторого момента времени $t_{пр}$ – заданного времени прогнозирования. При использовании этих методов результат прогнозирования (прогноз) обычно получают в

виде отнесения конкретного экземпляра к тому или иному классу. Причём класс характеризует уровень надёжности экземпляра до момента времени $t_{\text{пр}}$.

В практических приложениях находит применение случай отнесения контролируемого экземпляра к одному из двух классов: K_1 – классу надёжных экземпляров, K_2 – классу ненадёжных (дефектных) экземпляров. Приводимые далее соображения относятся именно к этому случаю.

Решение о классе конкретного экземпляра на момент времени $t_{\text{пр}}$ принимают по значениям его признаков, полученным в момент времени $t = 0$. Для принятия решения используется так называемое прогнозирующее правило, которое получают заранее с помощью предварительных исследований интересующего типа элементов или РЭУ.

Если информативные параметры (признаки) найдены или известны априори, то процедура решения задачи индивидуального прогнозирования включает следующие этапы: обучающий эксперимент; обучение; экзамен; индивидуальное прогнозирование однотипных экземпляров, не участвовавших в обучающем эксперименте.

Цель первых трёх этапов – построение прогнозирующего правила. Четвёртый этап – само индивидуальное прогнозирование.

Обучающий эксперимент состоит в испытании на надёжность в течение времени $t_{\text{пр}}$ выборки рассматриваемого типа изделия. Эту выборку называют обучающей. Перед проведением испытаний элементы обучающей выборки помечают и у каждого экземпляра этой выборки в момент времени $t = 0$ измеряют значения признаков. Так как заданное время $t_{\text{пр}}$ может быть большим (сотни, тысячи и даже десятки тысяч часов), то обычно проводят ускоренные испытания в течение времени $t_y \ll t_{\text{пр}}$, но эквивалентном с точки зрения возникновения отказов времени $t_{\text{пр}}$. По истечении времени испытаний фиксируется класс экземпляра. Результатом обучающего эксперимента является табл. 6.1, которая в неявном виде показывает связь признаков экземпляра в момент времени $t = 0$ с номером класса экземпляра в момент времени $t = t_{\text{пр}}$.

Обучение состоит в обработке результатов обучающего эксперимента (см. табл. 6.1) по алгоритму, определяемому используемым методом индивидуального прогнозирования. На практике широкое применение находят методы, основанные на эвристических алгоритмах [1, 3, 4]. С помощью этих методов прогнозирующее правило, используемое для принятия решения о классе j -го экземпляра, задаётся выражением вида

$$\left. \begin{aligned} X^{(j)} \in K_1, & \text{ если } F(x_1^{(j)}, \dots, x_k^{(j)}) \geq P_0 \\ X^{(j)} \in K_2, & \text{ если } F(x_1^{(j)}, \dots, x_k^{(j)}) < P_0 \end{aligned} \right\}, \quad (6.1)$$

где $X^{(j)} = \{x_1^{(j)}, \dots, x_k^{(j)}\}$ – образ j -го экземпляра;

$F(x_1^{(j)}, \dots, x_k^{(j)})$ – значение решающей функции, подсчитанное для j -го экземпляра;

$x_1, \dots, x_k$ – признаки, используемые для прогнозирования;

P_0 – порог (критерий) разделения классов.

Запись $x^{(j)} \in K_S$ означает, что j -й экземпляр относят к классу K_S ($S = 1, 2$).

Решающая функция F показывает, какие операции (арифметические, логические и др.) должны быть выполнены со значениями признаков. Она составляет основу метода прогнозирования.

Таблица 6.1

Форма записи результатов обучающего эксперимента

Номер экземпляра обучающей выборки	Значения признаков при $t = 0$			Класс экземпляра на момент времени $t_{\text{пр}}$
	x_1	...	x_k	
1	$x_1^{(1)}$	...	$x_k^{(1)}$	$K_S^{(1)}$
2	$x_1^{(2)}$	...	$x_k^{(2)}$	$K_S^{(2)}$
...	...	...	...	...
n	$x_1^{(n)}$	...	$x_k^{(n)}$	$K_S^{(n)}$

Приведённое прогнозирующее правило вида (6.1) предполагает, что более высокому уровню надёжности (классу K_1) в среднем соответствуют большие значения решающей функции F (рис. 6.1).

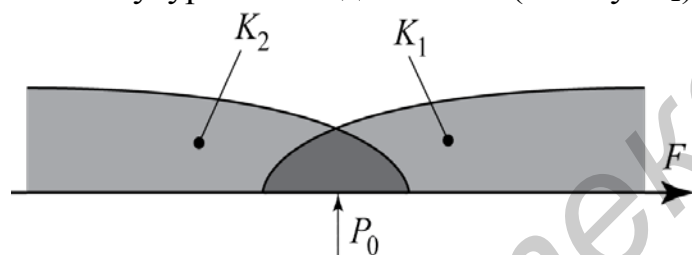


Рис. 6.1. К вопросу о соответствии значений функции F уровню надёжности

На этапе обучения подсчитывают значения решающей функции F для всех экземпляров обучающей выборки, т. е. ищется связь признаков (в момент времени $t = 0$) со значениями решающей функции F (говорят: выполняется обучение).

Задача следующего этапа – экзамена – состоит в выборе для прогнозирующего правила такого порога P_0 , который является лучшим с точки зрения прогнозирования. На этом этапе также выполняется оценка значений ошибок, которые могут возникнуть при прогнозировании новых экземпляров с помощью построенного прогнозирующего правила с выбранным значением порога P_0 (говорят, выполняют экзамен прогнозирующего правила).

Индивидуальное прогнозирование основано на использовании вероятностных связей между набором признаков и номером класса экземпляра, поэтому всегда существует определённая вероятность принятия ошибочных решений. В практических приложениях индивидуального прогнозирования с разделением на классы наиболее часто используют следующие две вероятности:

1) $P(K_1/\text{реш } K_2)$ – вероятность того, что экземпляр фактически принадлежит к классу K_1 при условии, что принято решение отнести его по прогнозу к классу K_2 ; эту вероятность называют риском изготовителя;

2) $P(K_2/\text{реш } K_1)$ – вероятность того, что экземпляр фактически принадлежит к классу K_2 при условии, что принято решение отнести его по прогнозу к классу K_1 ; эту вероятность называют риском потребителя.

Для простоты записи обозначим:

$$P(K_1/\text{реш } K_2) = p_{12};$$

$$P(K_2/\text{реш } K_1) = p_{21}.$$

С величиной p_{12} связаны ошибки первого рода n_{12} , а с величиной p_{21} – ошибки второго рода n_{21} .

Вероятности ошибочных решений вычисляются по результатам обучающего эксперимента и обучения по формулам [1]

$$p_{12} = \frac{n(K_1 / \text{реш } K_2)}{n(\text{реш } K_2)} = \frac{n_{12}}{n(\text{реш } K_2)}; \quad (6.2)$$

$$p_{21} = \frac{n(K_2 / \text{реш } K_1)}{n(\text{реш } K_1)} = \frac{n_{21}}{n(\text{реш } K_1)}, \quad (6.3)$$

где $n(K_U/\text{реш } K_V)$ – число ошибочных решений, заключающихся в отнесении по прогнозу экземпляров обучающей выборки в действительности класса K_U в класс K_V ; $U, V = 1, 2$; $U \neq V$;

$n(\text{реш } K_S)$ – общее число решений, заключающихся в отнесении экземпляров обучающей выборки по прогнозу к классу K_S ($S = 1, 2$).

Для количественной оценки достоверности прогнозирования используют также вероятность принятия правильных решений $P_{\text{прав}}$, определяемую по результатам обучающего эксперимента выражением [1]

$$P_{\text{прав}} = 1 - \frac{n(K_2 / \text{реш } K_1) + n(K_1 / \text{реш } K_2)}{n}, \quad (6.4)$$

где n – объём обучающей выборки.

На этапе экзамена величину порога разделения классов определяют путём просчёта по формулам (6.2)–(6.4) нескольких вариантов и выбора такого значения порога P_0 , при котором выполняется одно из заданных к достоверности прогнозирования условий

$$P_{\text{прав}} \rightarrow \max; \quad (6.5)$$

$$p_{12} \rightarrow \min \quad \text{при } p_{21} \leq p_{21 \text{ доп}}, \quad (6.6)$$

где $p_{21 \text{ доп}}$ – допустимое для данной задачи значение риска потребителя.

Если требования к достоверности прогнозирования обеспечиваются, то прогнозирование новых однотипных изделий, не принимавших участия в обучающем эксперименте, сводится к измерению значений признаков l -го экземпляра, вычислению для экземпляра значения решающей функции $F(x_1^{(l)}, \dots, x_k^{(l)})$, вид которой зависит от используемого метода, и проверке соотношения (6.1).

Описанная процедура индивидуального прогнозирования по признакам наглядно может быть отражена логической схемой, приведённой на рис. 6.2.

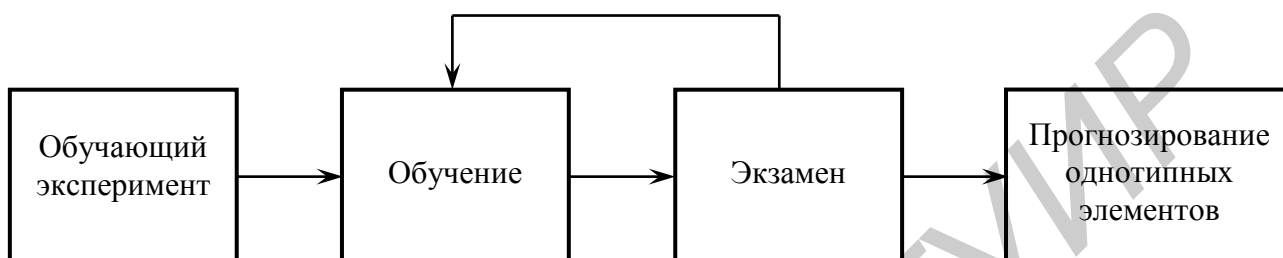


Рис. 6.2. Логическая схема процедуры прогнозирования

Обратная связь на схеме указывает на возможность уменьшения ошибок прогнозирования, если они велики.

6.2.2. Прогнозирование методом пороговой логики

Хорошо разработанные и широко используемые на практике методы прогнозирования по признакам, такие, как метод статистических решений (оптимальный метод) и метод потенциальных функций, при числе признаков $k > 2$ связаны с громоздкими математическими вычислениями. В этом случае использование указанных методов целесообразно лишь на основе применения ЭВМ и в условиях производства не всегда возможно. Другие, более простые, методы в ряде случаев не обеспечивают допустимых ошибок прогнозирования.

Простым и в то же время эффективным является метод индивидуального прогнозирования, основанный на принципах пороговой логики [1–3].

Суть метода пороговой логики (МПЛ) состоит в преобразовании признаков j -го экземпляра в двоичные числа (сигналы) и принятии решения о классе экземпляра по набору (комбинации) двоичных чисел.

При k признаках, используемых для прогнозирования, число возможных наборов двоичных чисел T определяется выражением

$$T = 2^k. \quad (6.7)$$

Поэтому прогнозирующее правило для этого метода может быть представлено простой логической таблицей с числом строк не более T . Таблица может использоваться непосредственно в наглядной форме или храниться в запоминающих устройствах.

Преобразование значений признаков $x_1, \dots, x_k$ в двоичные числа $z_1, \dots, z_k$ (ноль или единицу) может выполняться по соотношениям [1–3]:

$$\left. \begin{array}{l} z_i = 1, \text{ если } x_i \geq x_{i0} \\ z_i = 0, \text{ если } x_i < x_{i0} \end{array} \right\} \text{ при } m_i^{(1)} > m_i^{(2)}; \quad (6.8)$$

$$\left. \begin{array}{l} z_i = 1, \text{ если } x_i \leq x_{i0} \\ z_i = 0, \text{ если } x_i > x_{i0} \end{array} \right\} \text{ при } m_i^{(1)} < m_i^{(2)}, \quad (6.9)$$

где x_{i0} – выбираемое пороговое значение i -го признака, кратко – порог;
 $m_i^{(S)}$ – среднее значение i -го признака в классе K_S ($S = 1, 2$).

Прогнозирующее правило для данного метода прогнозирования задаётся соотношением [1–3]

$$R = \begin{cases} 1, & \text{если } \sum_{i=1}^k \alpha(z_i) \geq P_0; \\ 0, & \text{если } \sum_{i=1}^k \alpha(z_i) < P_0, \end{cases} \quad (6.10)$$

где R – выходной двоичный сигнал (пороговая функция), равный единице для класса K_1 и нулю для класса K_2 ;

$\alpha(z_i)$ – вес i -го двоичного сигнала;

P_0 – порог разделения классов, вещественное число (не путать с порогом x_{i0}).

Вес $\alpha(z_i)$ i -го двоичного сигнала z_i характеризует ценность z_i для процедуры прогнозирования и определяется соотношением [1–3]

$$\alpha(z_i) = \begin{cases} P(K_1 / z_i = 1), & \text{если } z_i = 1; \\ P(K_1 / z_i = 0), & \text{если } z_i = 0, \end{cases} \quad (6.11)$$

где $P(K_1 / z_i = \xi)$ – оценка вероятности того, что изделие принадлежит к классу K_1 при условии, что двоичный сигнал z_i принял значение $z_i = \xi$ ($\xi = 1, 0$).

Оценки вероятностей $P(K_1 / z_i = 1)$ и $P(K_1 / z_i = 0)$ получают из результатов испытаний изделий обучающей выборки, используя следующие выражения [1–3]:

$$P(K_1 / z_i = 1) = \frac{n(K_1 / z_i = 1)}{n(z_i = 1)}; \quad (6.12)$$

$$P(K_1 / z_i = 0) = \frac{n(K_1 / z_i = 0)}{n(z_i = 0)}, \quad (6.13)$$

где $n(K_1 / z_i = \xi)$ – число изделий класса K_1 в обучающей выборке, для которых двоичный сигнал z_i принял значение $z_i = \xi$ ($\xi = 1, 0$);

$n(z_i = \xi)$ – общее число изделий в обучающей выборке, для которых двоичный сигнал z_i принял значение $z_i = \xi$ ($\xi = 1, 0$).

При использовании на практике МПЛ рекомендуется следующая последовательность выполнения этапов обучения, оценки результатов обучения (экзамена) и прогнозирования однотипных изделий, не участвовавших в обучающем эксперименте:

- 1) определение порогов x_{i0} , необходимых для преобразования признаков в двоичные сигналы ($i = 1, 2, \dots, k$);
- 2) преобразование признаков каждого экземпляра обучающей выборки в двоичные сигналы;
- 3) определение веса $\alpha(z_i)$ двоичного сигнала z_i , причём по каждому признаку вес находят для двух значений этого сигнала: $z_i = 1$ и $z_i = 0$ ($i = 1, 2, \dots, k$);
- 4) подсчёт значения решающей функции для каждого экземпляра обучающей выборки;
- 5) построение решающего правила и определение значения порога разделения классов P_0 ;
- 6) представление решающего правила логической таблицей, используемой для выполнения прогнозирования;
- 7) прогнозирование однотипных изделий, не принимавших участия в обучающем эксперименте.

Ниже приводится пояснение указанных этапов.

1. Величина x_{i0} в МПЛ может выбираться как средняя точка зоны перекрытия (пересечения) классов K_1 и K_2 по признаку x_i (рис. 6.3).



Рис. 6.3. Группирование значений признака x_i на его числовой оси при наличии зоны перекрытия классов ($U, V=1, 2; U \neq V; x_{i0}$ – пороговый уровень)

Из рис. 6.3 видно, что

$$x_{i0} = \frac{x_{i \max}^{(K_U)} + x_{i \min}^{(K_V)}}{2}, \quad (6.14)$$

где $x_{i \max}^{(K_U)}$ – максимальное значение признака x_i , имевшее место в момент $t = 0$ для экземпляров класса K_U ;

$x_{i \min}^{(K_V)}$ – минимальное значение признака x_i , имевшее место в момент $t = 0$ для экземпляров K_V ; $U, V = 1, 2$; $U \neq V$.

Указанный способ является простейшим. Его недостаток состоит в том, что за счёт случайного разброса параметров-признаков для обучающей выборки может возникнуть ситуация «вложенности» классов (рис. 6.4).

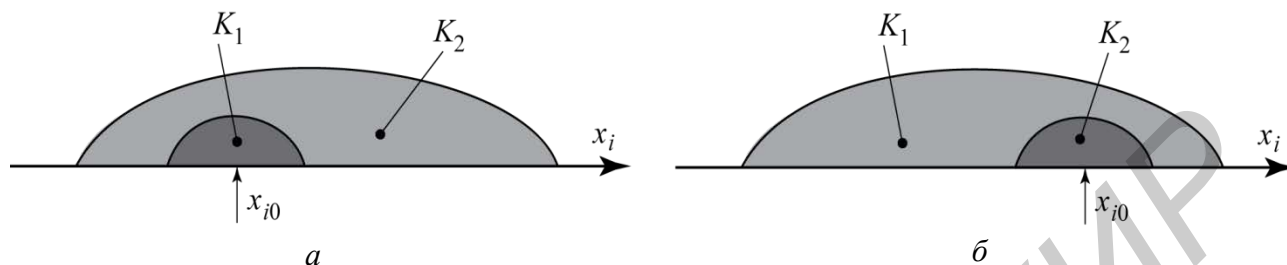


Рис. 6.4. Группирование значений признака x_i на его числовой оси в случае эффекта «вложенности» классов K_1 и K_2 :

a – класс K_1 вложен в класс K_2 ; b – класс K_2 вложен в класс K_1 ;

x_{i0} – пороговый уровень признака x_{i0}

В таких случаях применение способа для выбора x_{i0} проблематично.

Указанного недостатка лишён способ, при котором x_{i0} выбирают как среднюю точку между центрами классов K_1 и K_2 . В качестве центров классов можно использовать оценки математических ожиданий (т. е. средние значения) признака x_i в соответствующих классах, найденные с использованием экземпляров обучающей выборки (рис. 6.5).

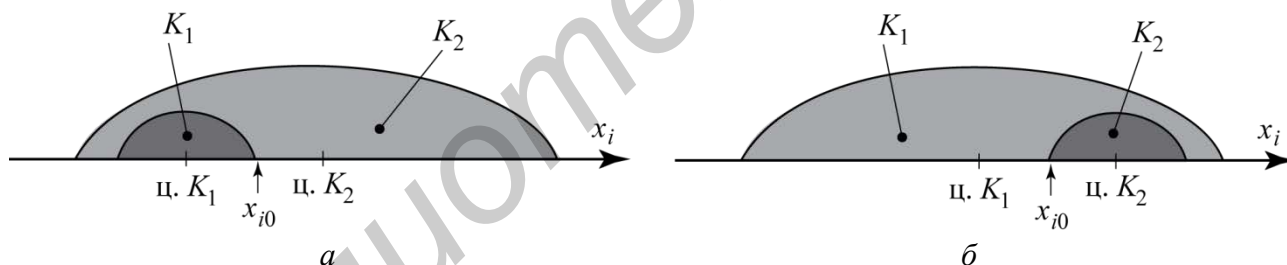


Рис. 6.5. Возможное расположение центров классов (средних значений x_i в классах) на числовой оси признака x_i в случае эффекта «вложенности» классов:

a – класс K_1 вложен в класс K_2 ; b – класс K_2 вложен в класс K_1 ;

ц. K_1 – центр класса K_1 ; ц. K_2 – центр класса K_2 ; x_{i0} – пороговый уровень признака x_i

В качестве рабочей формулы для определения порога x_{i0} можно использовать выражение

$$x_{i0} = \frac{M(x_i / K_1) + M(x_i / K_2)}{2}, \quad (6.15)$$

где $M(x_i / K_1)$ – математическое ожидание признака x_i , подсчитанное для экземпляров класса K_1 в обучающей выборке;

$M(x_i / K_2)$ – математическое ожидание признака x_i , подсчитанное для экземпляров класса K_2 в обучающей выборке.

Величина x_{i0} может также выбираться из условия [1, 3]

$$P_{\text{прав}}(x_{i0}) \rightarrow \max, \quad (6.16)$$

где $P_{\text{прав}}(x_{i0})$ – вероятность принятия правильных решений для экземпляров обучающей выборки, соответствующая выбираемому порогу x_{i0} .

С учётом выражений (6.8) и (6.9), используемых для преобразования признака x_{i0} в двоичный сигнал z_i , условие (6.16) равносильно следующему:

$$n(\text{реш } z_i = 1 / K_1) + n(\text{реш } z_i = 0 / K_2) \rightarrow \max, \quad (6.17)$$

где $n(\text{реш } z_i = 1 / K_1)$ – количество решений $z_i=1$, принятых по выражению (6.8) или (6.9) для экземпляров класса K_1 ;

$n(\text{реш } z_i = 0 / K_2)$ – количество решений $z_i=0$, принятых по выражению (6.8) или (6.9) для экземпляров класса K_2 .

При выборе величин x_{i0} условие (6.16) или, что то же самое, (6.17) нужно последовательно применить для каждого признака x_i ($i = 1, 2, \dots, k$).

Рассмотренные способы не являются оптимальными с точки зрения минимума вероятности принятия правильных решений [1, 3]. Способ на основе критерия (6.16) или, что то же самое, (6.17) даёт оптимальные результаты лишь в случае независимых признаков. Параметры-признаки полупроводниковых приборов (ППП) в той или иной степени всегда являются коррелированными, следовательно, и зависимыми. Поэтому применительно к ППП этот способ определения x_{i0} также не является лучшим.

В работе [2] предложен информационный подход определения x_{i0} , согласно которому оптимальным считается такое значение x_{i0} , при котором двоичный сигнал (нуль или единица), полученный по результатам преобразования признака, обеспечивает получение максимального количества информации о классе рассматриваемого экземпляра. Контроль (измерение) признака $x_i^{(j)}$ j -го экземпляра и его преобразование по выражению вида (6.8) или (6.9) в двоичный сигнал $z_i^{(j)}$ с учётом выбранного порогового уровня x_{i0} позволяет в какой-то степени снять неопределённость класса j -го экземпляра. Например, если по результатам преобразования окажется, что $z_i^{(j)} = 1$, то j -й экземпляр скорее всего окажется представителем класса K_1 , т. к. по результатам преобразования этому классу в основном должны соответствовать сигналы $z_i^{(j)} = 1$, и наоборот, при $z_i^{(j)} = 0$ – представителем класса K_2 .

Другими словами, пороговый уровень x_{i0} даёт о классе экземпляра определённое количество информации $I(x_{i0})$. В качестве критерия выбора x_{i0} логично взять максимум этой информации, т. е.

$$I(x_{i0}) \rightarrow \max. \quad (6.18)$$

Для информации $I(x_{i0})$ справедливо выражение

$$I(x_{i0}) = H(K_S) - H(K_S/x_{i0}), \quad (6.19)$$

где $H(K_S)$ – энтропия (степень неопределённости) класса экземпляра до контроля признака x_i и его преобразования в двоичный сигнал z_i с учётом выбранного значения x_{i0} ;

$H(K_S/x_{i0})$ – условная энтропия класса экземпляра после контроля признака x_i и преобразования его в двоичный сигнал z_i с учётом выбранного значения x_{i0} .

На основе положений теории информации, описанных в работе [4], получены следующие формулы для подсчёта величин $H(K_S)$ и $H(K_S/x_{i0})$ [2, 3]:

$$H(K_S) = - \sum_{S=1}^2 P(K_S) \cdot \log P(K_S); \quad (6.20)$$

$$H(K_S / x_{i0}) = - \sum_{\xi=0}^1 p(z_i = \xi) \cdot \sum_{S=1}^2 P(K_S / z_i = \xi) \cdot \log P(K_S / z_i = \xi), \quad (6.21)$$

где $p(z_i = \xi)$ – априорная вероятность того, что с учётом выбранного значения x_{i0} двоичный сигнал z_i примет значение, равное ξ ($\xi = 0, 1$);

$P(K_S/z_i = \xi)$ – условная вероятность того, что экземпляр принадлежит к классу K_S при условии, что с учётом выбранного значения x_{i0} двоичный сигнал z_i примет значение, равное ξ ($S = 1, 2$; $\xi = 0$ или $\xi = 1$).

Оценка всех вероятностей, используемых в формулах (6.20) и (6.21), может быть сделана по данным обучающего эксперимента и результатам преобразования по выражению (6.8) или (6.9) признака x_i в двоичный сигнал z_i с учётом выбранного значения x_{i0} .

$$p(z_i = \xi) = \frac{n(z_i = \xi)}{n}; \quad (6.22)$$

$$P(K_S / z_i = \xi) = \frac{n(K_S / z_i = \xi)}{n(z_i = \xi)}, \quad (6.23)$$

где $n(z_i = \xi)$ – количество в обучающей выборке экземпляров, для которых с учётом выбранного значения x_{i0} двоичный сигнал z_i принял значение, равное ξ ($\xi = 0, 1$);

$n(K_S/z_i = \xi)$ – количество в обучающей выборке экземпляров класса K_S , для которых с учётом выбранного значения x_{i0} двоичный сигнал z_i принял значение, равное ξ ($S = 1, 2$; $\xi = 0, 1$).

С учётом того, что в МПЛ z_i может принимать лишь два значения (нуль или единицу), рабочие формулы для подсчёта интересующих вероятностей примут вид [3]:

$$\left. \begin{aligned} P(K_1/1) &= \frac{n(K_1/1)}{n(1)}; & P(K_1/0) &= \frac{n(K_1/0)}{n(0)}; \\ P(K_2/1) &= \frac{n(K_2/1)}{n(1)}; & P(K_2/0) &= \frac{n(K_2/0)}{n(0)}; \\ p(1) &= \frac{n(1)}{n}; & p(0) &= \frac{n(0)}{n}, \end{aligned} \right\} \quad (6.24)$$

где $n(K_1/1)$ – число экземпляров класса K_1 , для которых $z_i = 1$;

$n(K_1/0)$ – число экземпляров класса K_1 , для которых $z_i = 0$;

$n(K_2/1)$ – число экземпляров класса K_2 , для которых $z_i = 1$;

$n(K_2/0)$ – число экземпляров класса K_2 , для которых $z_i = 0$;

$n(1)$ – общее число экземпляров, для которых $z_i = 1$;

$n(0)$ – общее число экземпляров, для которых $z_i = 0$.

Предполагается, что указанные характеристики соответствуют рассматриваемому значению x_{i0} .

Изменяя значения порога x_{i0} , с использованием формул (6.19)–(6.21) можно построить график зависимости информации $I(x_{i0})$ от величины x_{i0} и по нему с учётом критерия (6.18) выбрать оптимальное значение x_{i0} (рис. 6.6, а).

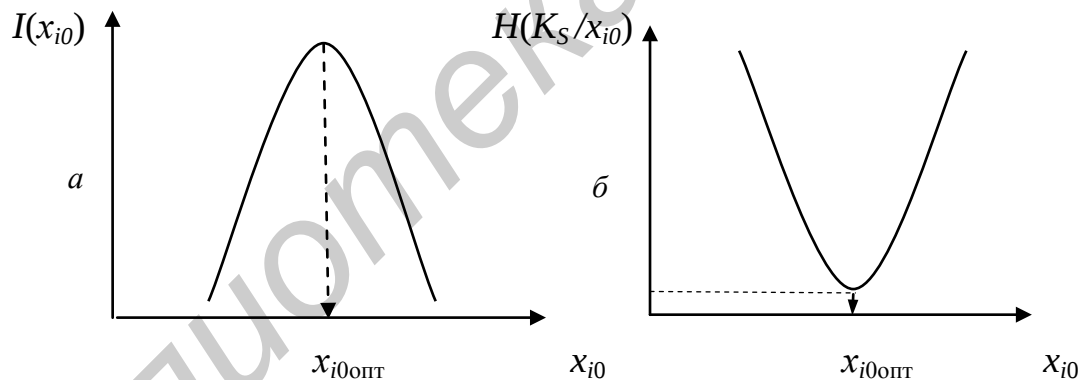


Рис. 6.6. Теоретические (гипотетические) зависимости информационных характеристик от порогового уровня x_{i0} :

a – для количества информации; b – для условной энтропии;

x_{i0opt} – оптимальное значение порогового уровня x_{i0}

Энтропия $H(K_S)$, используемая в выражении (6.20), для конкретной задачи индивидуального прогнозирования ППП является величиной постоянной. Поэтому при практическом определении оптимального значения x_{i0} можно также пользоваться критерием

$$H(K_S/x_{i0}) \rightarrow \min, \quad (6.25)$$

согласно которому лучшим считается такое значение x_{i0} , при котором условная энтропия (степень неопределённости) класса экземпляра минимальна. В этом

случае выбор x_{i0} может выполняться по графику зависимости условной энтропии $H(K_S / x_{i0})$ от x_{i0} (рис. 6.6, б).

2. Преобразование признаков $x_1, \dots, x_k$ экземпляров обучающей выборки в двоичные сигналы $z_1, \dots, z_k$ выполняется по выражениям (6.8), (6.9).

3. Для определения веса $\alpha(z_i)$ i -го двоичного сигнала с учётом выбранного порогового значения x_{i0} подсчитываются по соотношениям (6.12), (6.13) оценки вероятностей $P(K_1/z_i=1)$ и $P(K_1/z_i=0)$. Эти оценки в соответствии с выражением (6.11) принимаются в качестве веса $\alpha(z_i)$.

4. Значение решающей функции $F(z_1^{(j)}, \dots, z_k^{(j)})$ j -го экземпляра обучающей выборки определяется по формуле

$$F(z_1^{(j)}, \dots, z_k^{(j)}) = \sum_{i=1}^k \alpha(z_i^{(j)}), \quad (6.26)$$

где $\alpha(z_i^{(j)})$ – значение веса i -го двоичного сигнала z_i , взятое для j -го экземпляра с учётом его значения z_i .

5. Для определения порога разделения классов P_0 задаются несколькими точками из области изменения решающей функции $F(z_1, \dots, z_k)$ для экземпляров обучающей выборки. Для каждой выбранной точки, пользуясь правилом, задаваемым соотношением (6.10), подсчитывают по формуле (6.4) вероятность принятия правильных решений $P_{\text{прав}}$. В качестве искомого порога разделения классов P_0 берут такое значение, которое отвечает условию (6.5), т. е.

$$P_{\text{прав}} \rightarrow \max.$$

Выбор значения величины P_0 может выполняться также и по условию вида (6.6), т. е.

$$p_{12} \rightarrow \min \text{ при } p_{21} \leq p_{21 \text{ доп.}}$$

6. Представление прогнозирующего правила логической таблицей, используемой для прогнозирования, осуществляется следующим образом. Для всех теоретически возможных наборов двоичных сигналов $z_1, z_2, \dots, z_k$ подсчитываются по выражению (6.26) значения решающей функции $F(z_1, z_2, \dots, z_k)$. Используя построенное прогнозирующее правило вида (6.10), определяют, какому классу соответствует тот или иной набор двоичных сигналов.

Логическая таблица для прогнозирования оформляется в виде, приведённом на рис. 6.7. С целью уменьшения строк таблицы рекомендуется включать в неё наборы лишь для одного из классов.

7. Прогнозирование новых однотипных изделий, не принимавших участия в обучающем эксперименте, выполняется в следующем порядке:

- а) измерение значений признаков l -го экземпляра;
- б) преобразование признаков l -го экземпляра $x_1^{(l)}, x_2^{(l)}, \dots, x_k^{(l)}$ по выражению (6.8) или (6.9) в двоичные сигналы $z_1^{(l)}, z_2^{(l)}, \dots, z_k^{(l)}$;

в) поиск в логической таблице набора, соответствующего l -му экземпляру, и принятие решения о классе этого экземпляра.

Номер набора (комбинации)	Двоичные сигналы			Значения решающей функции по формуле (6.26)	Класс изделия по прогнозу
	z_1	...	z_k		
1	$z_1^{(1)}$	...	$z_k^{(1)}$	$F(z_1^{(1)}, \dots, z_k^{(1)})$	$K_s^{(1)}$
2	$z_1^{(2)}$	...	$z_k^{(2)}$	$F(z_1^{(2)}, \dots, z_k^{(2)})$	$K_s^{(2)}$
...	...	...	...	...	...

Рис. 6.7. Общий вид логической таблицы

6.3. Методика проведения исследований

Лабораторная работа предусматривает решение методом пороговой логики задачи индивидуального прогнозирования надёжности (качества) транзисторов типа 2Т645 на заданный будущий момент времени $t_{пр}$. При этом предполагается, что отобранные транзисторы повышенного уровня надёжности будут устанавливаться в устройства (каскады), работающие в ключевом режиме. Считаются также априори известными информативные параметры (признаки) транзистора для ключевого режима (табл. 6.2).

Таблица 6.2

Используемые информативные параметры

Информативный параметр	Обозначение по ГОСТу	Обозначение в программе для ЭВМ	Режим измерения
Коэффициент передачи тока базы в схеме с общим эмиттером	$h_{21Э}$	x_1	$I_Э = 600$ мА (ток эмиттера); $U_{КЭ} = 10$ В (напряжение коллектор – эмиттер)
Напряжение насыщения коллектор – эмиттер	$U_{КЭнас}$	x_2	$I_Э = 600$ мА; $I_Б = 100$ мА (ток базы)
Ток запертого транзистора	$I_{КЭХ}$	x_3	$U_{КЭ} = 10$ В; $U_{БЭ} = -5$ В (напряжение база – эмиттер)
Ёмкость коллекторного перехода	$C_К$	x_4	$U_{КБ} = 0$ (напряжение коллектор – база)

Время прогнозирования $t_{пр}$, на момент которого интересуются надёжностью транзистора, составляет обычно сотни, тысячи и даже десятки тысяч часов. Получение результатов обучающего эксперимента для времени $t_{пр}$ с использованием даже ускоренных испытаний, в рамках времени, отведённого для лабораторной работы, не представляется возможным. Поэтому в лабораторной работе результаты обучающего эксперимента для заданного момента времени $t_{пр}$ получают на ЭВМ с помощью математического моделирования информа-

тивных параметров и уровня надёжности транзисторов. В качестве уровня надёжности транзисторов указывается класс экземпляра к моменту времени $t_{пр}$: K_1 – для неотказавших (надёжных) и K_2 – для отказавших (потенциально ненадёжных) экземпляров.

Для удобства анализа результатов испытаний экземпляры обучающей выборки могут быть сгруппированы по классам. Вначале записываются экземпляры класса K_1 , а затем экземпляры класса K_2 . Соотношение между количеством экземпляров классов K_1 и K_2 зависит от заданного времени $t_{пр}$, в течение которого имитировалась работа (наработка) экземпляров обучающей выборки.

Чем больше значение объёма обучающей выборки (n), тем выше достоверность прогнозирования. На практике для элементов РЭУ n следует выбирать не менее 50...100.

Располагая результатом обучающего эксперимента, студент должен методом пороговой логики (см. п. 6.2.2) получить прогнозирующее правило в виде логической таблицы (см. рис. 6.7), которая может быть использована для принятия решения о классе новых экземпляров исследуемого типа транзисторов. Причём под словом «новые экземпляры» понимаются экземпляры, не принимавшие участия в обучающем эксперименте.

Экземпляры, которые участвовали в обучающем эксперименте, свою функцию выполнили, и, если они даже оказались надёжными (класс K_1), ставить их в устройства нельзя.

Покажем на примере, как определить пороговые значения x_{i0} и как подсчитывать веса двоичных сигналов z_i .

Пример 6.1. Определим пороговое значение x_{i0} признака x_i . Результаты измерений признака x_i в момент времени $t = 0$ и информация о классе экземпляров в момент времени $t = t_{пр}$ представлены в табл. 6.3 (столбцы 1–3). Объём обучающей выборки $n = 10$ использован исключительно для упрощения иллюстрации определения x_{i0} .

Таблица 6.3

Результаты обучающего эксперимента и преобразования признака

Номер экземпляра	Значение x_i при $t = 0$	Номер класса при $t = t_{пр}$	Значение сигнала z_i
1	14	1	1
2	13	1	1
3	10,5	1	0
4	14	1	1
5	10,5	1	0
6	13	1	1
7	10	2	0
8	7	2	0
9	15	2	1
10	6	2	0

Решение

Анализируя значения признака x_i экземпляров класса K_1 и класса K_2 , можно убедиться, что имеет место эффект «вложенности» класса K_1 в класс K_2 (рис. 6.8).

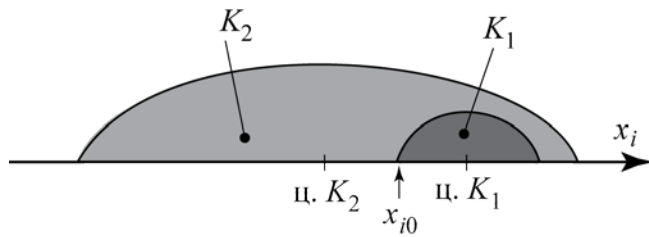


Рис. 6.8. Эффект «вложенности» классов

Определим значение x_{i0} с помощью формулы (6.15).

Используя экземпляры класса K_1 , находим

$$M(x_i / K_1) = \text{ц. } K_1 = 12,5.$$

Принимая во внимание значения x_i для экземпляров класса K_2 , получим

$$M(x_i / K_2) = \text{ц. } K_2 = 9,5.$$

Следовательно, согласно формуле (6.15):

$$x_{i0} = (12,5 + 9,5)/2 = 11.$$

Значения двоичного сигнала z_i , соответствующие выбранному пороговому уровню $x_{i0} = 11$, получены по соотношению (6.8). Они представлены в табл. 6.3 (последний столбец) и в дальнейшем будут использованы для определения веса двоичного сигнала, т. е. значения $\alpha(z_i)$.

Пример 6.2. Для условий примера 6.1 определить вес двоичного сигнала x_i при пороговом значении, равном $x_{i0} = 11$.

Решение

1. Используя формулы (6.12), (6.13) подсчитаем оценки вероятностей принадлежности экземпляра обучающей выборки к классу K_1 при условии, что двоичный сигнал z_i принял значение $z_i = 1$ и значение $z_i = 0$.

С помощью табл. 6.3 (последний столбец) подсчитываем

$$n(K_1 / z_i = 1) = 4; n(K_1 / z_i = 0) = 2; n(z_i = 1) = 5; n(z_i = 0) = 5.$$

Тогда

$$P(K_1 / z_i = 1) = \frac{n(K_1 / z_i = 1)}{n(z_i = 1)} = \frac{4}{5} = 0,8;$$

$$P(K_1 / z_i = 0) = \frac{n(K_1 / z_i = 0)}{n(z_i = 0)} = \frac{2}{5} = 0,4.$$

2. В качестве весов $\alpha(z_i)$ входного сигнала z_i в соответствии с выражением (6.11) выбираем

$$\alpha(z_i) = \begin{cases} 0,8, & \text{если } z_i = 1; \\ 0,4, & \text{если } z_i = 0. \end{cases}$$

В дальнейшем значения весов $\alpha(z_i)$ используются при подсчёте по формуле (6.26) значения решающей функции F , соответствующей j -му экземпляру.

Порог разделения классов P_0 в прогнозирующем правиле (6.10), получаемом методом пороговой логики, ищется способом, рассмотренным в п. 6.2.1. Оптимальное значение величины P_0 может определяться с учётом критерия (6.5) либо (6.6).

Пример 6.3 (иллюстрация подсчёта характеристик n_{21} , n_{12} , $P_{\text{прав}}$, p_{12} , p_{21}). В табл. 6.4 приведены значения решающей функции F , подсчитанные для экземпляров обучающей выборки. Объём обучающей выборки $n = 8$ использован, как и ранее, исключительно для упрощения иллюстрации расчётов.

Таблица 6.4

Значения решающей функции F для экземпляров обучающей выборки

Номер экземпляра	Номер действительного класса при $t = t_{\text{пр}}$	Значение функции F	Номер класса экземпляра по прогнозу при выбранном значении $P_0 = 2,3$
1	1	2,8	1
2	1	2,1	2
3	1	2,2	2
4	1	2,7	1
5	2	2,0	2
6	2	2,1	2
7	2	2,4	1
8	2	1,8	2

Требуется рассчитать значения характеристик $P_{\text{прав}}$, p_{12} , p_{21} для точки $P_0 = 2,3$, взятой из области пересечения классов K_1 и K_2 (перекрытия значений функции F).

Решение

1. Подставляя в прогнозирующее правило (6.10) значение порога $P_0 = 2,3$, определяем класс экземпляров по прогнозу (см. последний столбец табл. 6.4).

2. Сравнивая действительный класс экземпляра (см. второй столбец табл. 6.4) с классом экземпляра по прогнозу (см. последний столбец табл. 6.4), определяем значения $n_{12} = n(K_1/\text{реш } K_2)$, $n_{21} = n(K_2/\text{реш } K_1)$, $n(\text{реш } K_1)$, $n(\text{реш } K_2)$. Нетрудно убедиться, что

$$n_{12} = 2; \quad n_{21} = 1; \quad n(\text{реш } K_1) = 3; \quad n(\text{реш } K_2) = 5.$$

3. По формулам (6.2)–(6.4) подсчитываем искомые характеристики, учитывая, что объём обучающей выборки $n = 8$.

$$P_{\text{прав}} = 1 - \frac{n_{21} + n_{12}}{n} = 1 - \frac{1 + 2}{8} = 0,625;$$

$$p_{12} = \frac{n_{12}}{n(\text{реш } K_2)} = \frac{2}{5} = 0,4;$$

$$p_{21} = \frac{n_{21}}{n(\text{реш } K_1)} = \frac{1}{3} \approx 0,33.$$

6.4. Особенность учебной программы для ЭВМ

Программа для ЭВМ, используемая в лабораторной работе, написана таким образом, что все последующие действия процедуры прогнозирования студенту подсказываются. Однако при выполнении каждого этапа процедуры студенту необходимо безошибочно выбрать очередное действие (операцию) в предлагаемом выпадающем меню, что возможно в случае осмысливания им процедуры построения и применения прогнозирующего правила. При ошибочных действиях студенту начисляются штрафные баллы, их количество отображается по завершении работы учебной программы. Повторно программа не может быть запущена без ввода пароля преподавателем.

Некоторые редакции учебной программы имеют режим, при котором отдельные характеристики и величины должны быть студентом определены путём обычного «ручного» расчёта. Если расчёт сделан верно, то ЭВМ в автоматическом режиме подсчитывает остальную требуемую информацию, т. е. от «чисто механической» работы студент освобождается.

После того как прогнозирующее правило в виде логической таблицы построено, студенту предлагается применить это правило к экземплярам контрольной выборки, действительная надёжность которых на момент времени $t_{\text{пр}}$ будет указана после получения студентом прогнозного класса экземпляра.

6.5. Задания на экспериментальную часть лабораторной работы

1. Уточнить у преподавателя исходные данные, необходимые для моделирования на ЭВМ обучающего эксперимента. Этими данными являются:

- число информативных параметров (признаков), используемых для решения задачи индивидуального прогнозирования (следует принять $n = 4$, если нет других указаний от преподавателя);
- объём обучающей выборки (следует использовать $n = 100$, если нет других указаний);
- время, для которого интересуются надёжностью транзисторов (по умолчанию принимается $t_{\text{пр}} = 7\,000$ ч, если нет других указаний).

2. Запустить программу для ЭВМ с именем **nts6** и выполнить этап «Обучающий эксперимент». Для каждого признака просмотреть гистограммы распределения для экземпляров классов K_1 и K_2 . В некоторых редакциях программы для ЭВМ её выполнение начинается после ввода кода преподавателем.

3. Перейти к этапу «Обучение». Указать ЭВМ способ определения x_{i0} и последовательно найти этот порог для каждого признака. Просматривая результаты обучающего эксперимента (п. 2), подтвердить «ручным» расчётом значение порога x_{i0} для одного из признаков, указанных преподавателем.

Примечание. Для некоторых редакций учебной программы для ЭВМ студенту предлагается для признака, который будет указан ЭВМ, «ручными» приёмами определить значение порогового уровня x_{i0} и ввести его в ЭВМ по запросу программы. Если значение x_{i0} найдено верно (допускается погрешность не более $\pm 5\%$), то значения пороговых уровней для остальных признаков будут подсчитаны ЭВМ автоматически.

4. Проанализировать двоичные сигналы для каждого признака (столбца) и определить «ручным» расчётом вес двоичных сигналов $z_i = 1$ и $z_i = 0$ (см. пример 6.2).

5. Продолжить этап «Обучение». Получить с помощью учебной программы для ЭВМ значения функции F для экземпляров обучающей выборки и на примере первых 5–10 экземпляров (экземпляры класса K_1) убедиться в достоверности значений F .

6. Подсчитать для указанных ЭВМ неповторяющихся сочетаний (комбинаций) сигналов z_i значения решающей функции F . Если данная комбинация z_i уже присутствует в ранее полученной таблице, то при нахождении F этим следует воспользоваться.

7. Завершив этап «Обучение», перейти к этапу «Экзамен». Для определения порога разделения классов P_0 выбрать условие $P_{\text{прав}} \rightarrow \max$ и выполнить этап «Экзамен», следуя указаниям программы для ЭВМ.

8. Просмотреть график зависимости $P_{\text{прав}}$ от порога P_0 . В качестве искомой величины P_0 выбирается такое значение, которое отвечает условию $P_{\text{прав}} \rightarrow \max$. ЭВМ укажет P_0 и точные значения характеристик $P_{\text{прав}}$, p_{12} и p_{21} , подсчитанных при этом значении P_0 . Уточнить логическую таблицу, содержащую неповторяющиеся комбинации двоичных сигналов, оставив в ней только комбинации z_i , соответствующие одному из классу (K_1 или K_2).

9. Перейти к этапу «Индивидуальное прогнозирование новых экземпляров». По запросу программы дать указание ЭВМ о числе транзисторов контрольной выборки, надёжность которых на момент времени $t_{\text{пр}}$ известна, но временно недоступна для пользователя ЭВМ. Число экземпляров контрольной выборки брать не менее 20.

Транзисторы контрольной выборки предъявляются для анализа по одному экземпляру. Задача студента – с учётом значений пороговых уровней x_{i0} преобразовать признаки исследуемого экземпляра в двоичные сигналы z_i , с помощью логической таблицы принять решение о классе экземпляра и сообщить это ЭВМ. После чего ЭВМ укажет действительный класс экземпляра. В процессе анализа экземпляров контрольной выборки ЭВМ подсчитывает число правильных и ошибочных решений (прогнозов). После завершения анализа экземпляров контрольной выборки она даёт оценку вероятности принятия правильных решений применительно к этой выборке.

10. Используя результаты, полученные в п. 8, построить графики зависимости риска потребителя p_{21} и риска изготовителя p_{12} от выбираемого значения порога P_0 и с помощью графиков определить значение порога P_0 , соответствующее условию $p_{21} \leq p_{21\text{доп}}$ (при $p_{12} \rightarrow \min$). Рекомендуется $p_{21\text{доп}}$ брать не выше значения 0,1 (10 %), согласовав его с преподавателем.

Далее следует получить логическую таблицу, содержащую комбинации двоичных сигналов, соответствующие одному из классов (K_1 или K_2). После этого, используя полученную логическую таблицу (прогнозирующее правило), необходимо выполнить действия, указанные в п. 9.

Примечания: 1. В п. 10 значение величины $p_{21\text{доп}}$ согласовывается с преподавателем.

2. Расчёт некоторых величин, выполняемых «ручными» приёмами, может быть опущен по указанию преподавателя. Для этого им вводится в ЭВМ код сложности работы.

6.6. Содержание отчёта

1. Цель работы.

2. Исходные данные, используемые для решения задачи индивидуального прогнозирования: число признаков k ; количество экземпляров обучающей выборки n ; время, для которого интересуются надёжностью, $t_{\text{пр}}$; допустимое значение риска потребителя $p_{21\text{доп}}$, если выполнялось задание 10 экспериментальной части лабораторной работы.

3. Таблица с указанием номера признака, его физического смысла, порогового уровня x_{i0} , а также знака соотношения, при котором значение признака преобразуется в двоичный сигнал $z_i = 1$; $i = 1, \dots, k$. Кроме того, необходимо указать способ, используемый для определения значений x_{i0} .

4. Таблица с указанием номеров признаков и весов двоичных сигналов $z_i = 1$ и $z_i = 0$; $i = 1, \dots, k$.

5. Прогнозирующее правило в виде логической таблицы, полученной исходя из критерия $P_{\text{прав}} \rightarrow \max$. Необходимо также указать оценку вероятности принятия правильных решений для выбранного значения порога P_0 .

6. Результаты сравнения характеристик $P_{\text{прав}}$, полученных при построении прогнозирующего правила и при его применении к экземплярам контрольной выборки.

7. Прогнозирующее правило в виде логической таблицы, полученной исходя из критерия $p_{21} \leq p_{21\text{доп}}$ (при $p_{12} \rightarrow \min$), а также результаты сравнения характеристик p_{21} и p_{12} , полученных при построении прогнозирующего правила и при его применении к экземплярам контрольной выборки.

Примечание. Этот пункт включается в отчёт, если по указанию преподавателя выполнялось задание 10 экспериментальной части лабораторной работы.

8. Выводы по проделанной работе.

6.7. Контрольные вопросы

1. Что понимают под индивидуальным прогнозированием?
2. На чём основано индивидуальное прогнозирование надёжности элементов методом распознавания образа?
3. Что понимают под информативным параметром (кратко – признаком)?
4. Что такое прогнозирующее правило, как им пользоваться для индивидуального прогнозирования новых экземпляров (экземпляров, не принимавших участия в обучающем эксперименте)?
5. Укажите в процедуре индивидуального прогнозирования этапы, предназначенные для получения прогнозирующего правила.
6. Какова суть и назначение обучающего эксперимента?
7. Какова роль решающей функции в прогнозирующем правиле, используемом для разделения выборки изделий на классы с точки зрения уровня надёжности?
8. Что понимают под вероятностью принятия правильных решений в случае индивидуального прогнозирования надёжности изделий по информативным параметрам?
9. Какие виды ошибок могут иметь место при индивидуальном прогнозировании с разделением выборки (партии) изделий на классы с точки зрения уровня надёжности?
10. Какие ошибки прогнозирования описывают понятием «риск изготовителя», а какие – понятием «риск потребителя»?
11. В чём состоит отличительная особенность метода пороговой логики от других методов, используемых для решения задач индивидуального прогнозирования надёжности изделий по информативным параметрам?
12. Что представляет собой логическая таблица, получаемая в методе пороговой логики?
13. К чему сводится индивидуальное прогнозирование новых экземпляров в случае использования логической таблицы?

Литература

1. Боровиков, С. М. Теоретические основы конструирования, технологии и надёжности : учебник для студ. инж.-техн. спец. вузов / С. М. Боровиков. – Минск : Дизайн ПРО, 1998. – 336 с.
2. Метод прогнозирования надёжности изделий электронной техники / С. М. Боровиков [и др.] // Доклады НАН Беларуси. – 2006. – Т. 50, № 4. – С. 105–109.
3. Боровиков, С. М. Статистическое прогнозирование для отбраковки потенциально ненадёжных изделий электронной техники : монография / С. М. Боровиков. – М. : Новое знание, 2013. – 343 с.
4. Вентцель, Е. С. Теория вероятностей : учебник / Е. С. Вентцель. – 9-е изд., стереотип. – М. : Академия, 2003. – 576 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ

СПРАВОЧНЫЕ ТАБЛИЦЫ К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ №1

Таблица П.1

Значения гамма-функции $\Gamma(x)$

x	$\Gamma(x)$	x	$\Gamma(x)$	x	$\Gamma(x)$
1,00	1,0000	1,35	0,8912	1,70	0,9086
1,05	0,9735	1,40	0,8873	1,75	0,9191
1,10	0,9514	1,45	0,8857	1,80	0,9314
1,15	0,9330	1,50	0,8862	1,85	0,9456
1,20	0,9182	1,55	0,8889	1,90	0,9618
1,25	0,9064	1,60	0,8935	1,95	0,9799
1,30	0,8975	1,65	0,9001	2,00	1,000

Примечание. Для получения $\Gamma(x)$ для значений x , не приведённых в табл. П.1, допускается использовать линейную интерполяцию.

Свойства функции $\Gamma(x)$:

1. $\Gamma(a + 1) = a\Gamma(a)$.
2. $\Gamma(n + 1) = n!$, где n – целое число.
3. $\Gamma\left(\frac{1}{2}\right) = \sqrt{\pi}$.

Таблица П.2

Значения нормальной функции распределения $\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{t^2}{2}} dt$

x	$\Phi(x)$	x	$\Phi(x)$	x	$\Phi(x)$	x	$\Phi(x)$	x	$\Phi(x)$	x	$\Phi(x)$
-3,2	0,0007	-2,1	0,0179	-1,0	0,1587	0,1	0,5398	1,2	0,8849	2,3	0,9892
-3,1	0,0010	-2,0	0,0228	-0,9	0,1841	0,2	0,5793	1,3	0,9032	2,4	0,9918
-3,0	0,0014	-1,9	0,0288	-0,8	0,2119	0,3	0,6179	1,4	0,9192	2,5	0,9937
-2,9	0,0019	-1,8	0,0359	-0,7	0,2420	0,4	0,6554	1,5	0,9332	2,6	0,9953
-2,8	0,0026	-1,7	0,0446	-0,6	0,2743	0,5	0,6915	1,6	0,9452	2,7	0,9965
-2,7	0,0035	-1,6	0,0548	-0,5	0,3085	0,6	0,7257	1,7	0,9554	2,8	0,9974
-2,6	0,0047	-1,5	0,0668	-0,4	0,3446	0,7	0,7580	1,8	0,9641	2,9	0,9981
-2,5	0,0063	-1,4	0,0808	-0,3	0,3821	0,8	0,7881	1,9	0,9713	3,0	0,9986
-2,4	0,0082	-1,3	0,0968	-0,2	0,4207	0,9	0,8159	2,0	0,9772	3,1	0,9990
-2,3	0,0108	-1,2	0,1151	-0,1	0,4602	1,0	0,8413	2,1	0,9821	3,2	0,9993
-2,2	0,0139	-1,1	0,1357	0,0	0,5000	1,1	0,8643	2,2	0,9861	3,3	0,9995

Примечание. Для получения $\Phi(x)$ для значений x , не приведённых в табл. П.2, допускается использовать линейную интерполяцию.

Учебное издание

Боровиков Сергей Максимович
Шнейдеров Евгений Николаевич
Гришель Рафаил Петрович
Фролов Александр Владимирович

НАДЁЖНОСТЬ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ. ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

ПОСОБИЕ

Редактор *М. А. Зайцева*
Корректор *Е. Н. Батурчик*
Компьютерная правка, оригинал-макет *В. М. Задоля*

Подписано в печать 10.04.2015. Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».
Отпечатано на ризографе. Усл. печ. л. 4,42. Уч.-изд. л. 4,3. Тираж 100 экз. Заказ 218.

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий №1/238 от 24.03.2014,
№2/113 от 07.04.2014, №3/615 от 07.04.2014.
ЛП №02330/264 от 14.04.2014.
220013, Минск, П. Бровки, 6