

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

Кафедра проектирования информационно-компьютерных систем

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ
ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ.
Лабораторный практикум**

*Рекомендовано УМО по образованию
в области информатики и радиоэлектроники для специальностей
1-39 02 01 «Моделирование и компьютерное проектирование РЭС» и
1-39 02 02 «Проектирование и производство РЭС» в качестве пособия*

Минск БГУИР 2013

УДК 621.38-027.31(076.5)

ББК 32.85-02я7

Т33

Авторы:

С. М. Боровиков, Е. Н. Шнейдеров,
А. И. Бересневич, Т. В. Малышева, Р. П. Гришель

Рецензенты:

заведующий кафедрой информационных технологий в управлении
Белорусского национального технического университета,
доктор технических наук, профессор В. Ф. Голиков;

заведующий кафедрой автоматизированных систем обработки информации
учреждения образования «Международный государственный экологический
университет имени А. Д. Сахарова», кандидат технических наук,
доцент И. И. Шпак

Т33 **Теоретические основы проектирования электронных устройств.**
Лабораторный практикум : пособие / С. М. Боровиков [и др.] ; под ред.
С. М. Боровикова. – Минск : БГУИР, 2013. – 63 с. : ил.
ISBN 978-985-488-928-3.

Пособие состоит из описания шести лабораторных работ по учебным дисциплинам «Теоретические основы проектирования и надёжности РЭС» и «Теоретические основы конструирования, технологии и надёжности» для студентов специальностей «Моделирование и компьютерное проектирование РЭС» и «Проектирование и производство РЭС» всех форм обучения.

Практические задания пособия могут быть использованы для выполнения лабораторных работ по учебной дисциплине «Теоретические основы проектирования электронных систем безопасности» специальности «Электронные системы безопасности».

УДК 621.38-027.31(076.5)

ББК 32.85-02я7

ISBN 978-985-488-928-3

© УО «Белорусский государственный
университет информатики
и радиоэлектроники», 2013

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	5
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1 Исследование отклонений выходного параметра РЭУ методом Монте-Карло с использованием физического моделирования	6
1.1. Цель работы.....	6
1.2. Теоретические сведения	6
Суть метода Монте-Карло	7
1.3. Описание лабораторного макета	10
1.4. Задание на экспериментальную часть лабораторной работы.....	10
1.5. Содержание отчёта.....	11
1.6. Контрольные вопросы	12
ЛИТЕРАТУРА	12
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2 Определение коэффициентов влияния первичных параметров	13
2.1. Цель работы.....	13
2.2. Теоретические сведения	13
2.3. Описание лабораторного макета	14
2.4. Задание на экспериментальную часть лабораторной работы.....	15
2.5. Содержание отчёта.....	16
2.6. Контрольные вопросы	16
ЛИТЕРАТУРА	16
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3 Исследование отклонений выходного параметра РЭУ методом Монте-Карло с использованием математического моделирования	17
3.1. Цель работы.....	17
3.2. Теоретические сведения	17
3.3. Исследуемое РЭУ и его математическая модель	18
3.4. Задание на экспериментальную часть лабораторной работы.....	19
3.5. Содержание отчёта.....	20
3.6. Контрольные вопросы	21
ЛИТЕРАТУРА	21
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4 Определение показателей надёжности РЭУ моделированием на ЭВМ отказов элементов	22
4.1. Цель работы.....	22
4.2. Теоретические сведения	22
4.3. Задание на экспериментальную часть	26
4.4. Содержание отчёта.....	27
4.5. Контрольные вопросы	28
ЛИТЕРАТУРА	28

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №5 Проверка правильности выбора элементов электронного каскада по коэффициентам электрической нагрузки.....	29
5.1. Цель работы.....	29
5.2. Теоретические сведения	29
Априорное ограничение нагрузки элементов РЭС.....	30
5.3. Объект исследования. Методика проведения исследований	33
5.4. Задание на экспериментальную часть	36
5.5. Содержание отчёта	37
5.6. Контрольные вопросы	37
ЛИТЕРАТУРА	38
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №6 Отбор транзисторов повышенного уровня надёжности методом индивидуального прогнозирования	39
6.1. Цель работы.....	39
6.2. Теоретические сведения	39
6.2.1. Индивидуальное прогнозирование надёжности элементов и РЭС методами распознавания образов: общие сведения ...	39
6.2.2. Прогнозирование методом пороговой логики.....	43
6.3. Методика проведения исследований	51
6.4. Задание на экспериментальную часть	55
6.5. Содержание отчёта	57
6.6. Контрольные вопросы	58
ЛИТЕРАТУРА	58
ПРИЛОЖЕНИЕ	60

ВВЕДЕНИЕ

Дисциплины «Теоретические основы проектирования и надёжности РЭС» и «Теоретические основы конструирования, технологии и надёжности» предусматривают изучение основных понятий и методов, используемых для расчётно-аналитической оценки качества конструкций радиоэлектронных средств (РЭС), анализа точности и стабильности параметров конструкций и технологических процессов, оценки и прогнозирования эксплуатационной надёжности элементов и радиоэлектронных устройств (РЭУ), а также анализа параметров и свойств конструкций РЭС методом имитационного (статистического) моделирования.

Предлагаемые лабораторные работы способствуют усвоению студентами методов, которые применяют в радиоэлектронике для расчётно-аналитического и экспериментального исследования конструкций, технологии и надёжности РЭС.

В результате изучения дисциплин студент должен:

знать:

– способы описания компоновочных характеристик конструкций РЭС и методы количественной оценки качества РЭС;

– виды допусков, используемые для описания точности и стабильности параметров изделий радиоэлектроники;

– модели отказов, суть показателей надёжности элементов и устройств, характеристику надёжности элементной базы РЭС, принципы оценки и прогнозирования надёжности изделий радиоэлектроники, методы повышения надёжности конструкций РЭС;

– методы статистического моделирования параметров РЭС и технологических процессов;

уметь:

– выполнять количественную оценку уровня качества конструкций РЭС с использованием единичных и комплексных показателей;

– применять вероятностно-статистические методы для анализа точности и стабильности параметров конструкций РЭС;

– рассчитывать показатели надёжности радиоэлектронных устройств и внедрять методы повышения надёжности устройств на этапах проектирования, производства и эксплуатации;

– применять методы прогнозирования для предсказания функциональных параметров и надёжности элементов и устройств;

– выполнять с использованием ЭВМ статистическое моделирование параметров конструкций РЭС, систем массового обслуживания, надёжности элементов и устройств;

приобрести навыки:

– практического применения прикладных программных пакетов для решения инженерных задач в области качества и надёжности РЭС.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1

ИССЛЕДОВАНИЕ ОТКЛОНЕНИЙ ВЫХОДНОГО ПАРАМЕТРА РЭУ МЕТОДОМ МОНТЕ-КАРЛО С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

1.1. Цель работы

Исследование вероятностного рассеивания выходного параметра РЭУ с учётом производственных погрешностей параметров элементов и назначение на основе этого производственного допуска на выходной параметр.

1.2. Теоретические сведения

Производственный, иначе – технологический, допуск – характеристика параметра, ограничивающая его предельные отклонения, вызываемые чисто производственными причинами. Производственный допуск может быть задан значением абсолютной производственной погрешности, выражаемой размерностью рассматриваемого параметра или же значением его относительной производственной погрешности, выражаемой обычно в процентах.

Примеры: $U = (5 \pm 0,25) \text{ В}; R = 1 \text{ кОм} \pm 100 \text{ Ом};$
 $U = 5 \text{ В} \pm 5 \%; R = 1 \text{ кОм} \pm 10 \%.$

На практике для выполнения анализа отклонений (разброса, рассеивания) выходного параметра необходимо знать функциональную связь вида

$$y = \varphi(x_1, x_2, \dots, x_n), \quad (1.1)$$

где y – выходной параметр;

x_1, x_2, \dots, x_n – первичные параметры;

n – общее число учитываемых первичных параметров.

Зная зависимость (1.1), с помощью аналитических методов [1, 3] можно выполнить анализ отклонений выходного параметра y с учётом вероятностного разброса значений первичных параметров x_1, x_2, \dots, x_n и на основе этого назначить допуск на выходной параметр.

Однако аналитические методы оправданы и дают удовлетворительные результаты в том случае, если выражение вида (1.1) относительно точно описывает поведение РЭУ или процесса и известны корреляционные связи между первичными параметрами. В других случаях неплохие результаты можно получить с помощью метода Монте-Карло, называемого также методом статистических испытаний [1, 2].

Суть метода Монте-Карло

Суть метода Монте-Карло состоит в повторяющемся многократном получении реализаций РЭУ или технологического процесса (в дальнейшем обобщенно – процесса) (рис. 1.1). Каждая реализация состоит в получении значения выходного параметра y путём подстановки случайной комбинации значений первичных параметров x_1, x_2, \dots, x_n в математическую модель вида (1.1) или набором значений x_1, x_2, \dots, x_n на физической модели. При этом значения первичных параметров, соответствующие той или иной реализации, получают не произвольно, а с учётом вероятностного описания первичных параметров.

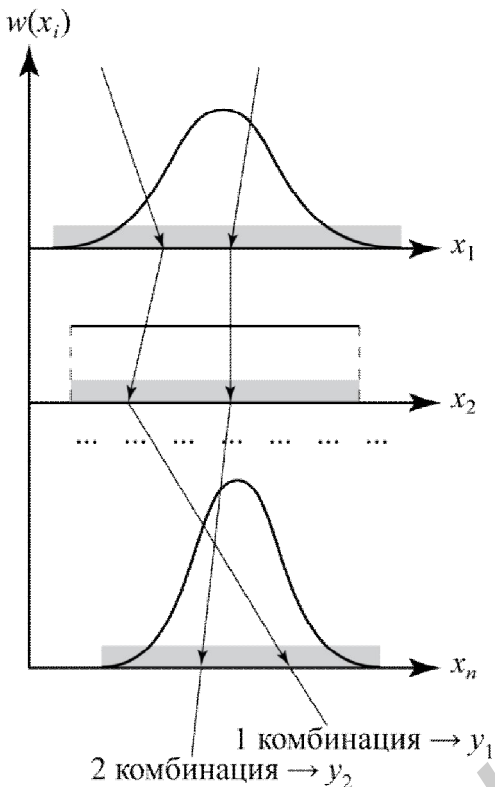


Рис. 1.1. Получение случайных комбинаций первичных параметров

$\delta(\Delta x_i/x_i)$ – половины полей рассеивания относительных производственных погрешностей первичных параметров, называемые половиной поля допуска (случайные составляющие допуска);

$w(\Delta x_i/x_i)$ – функции плотностей распределения относительных производственных погрешностей первичных параметров.

Следует знать, что между двумя группами указанных характеристик существует однозначная связь, т. е. от одной группы характеристик можно переходить к другой и наоборот.

При реализации метода Монте-Карло среднее значение $M(y)$ и СКО $\sigma(y)$ выходного параметра получают путем статистической обработки результатов всех реализаций, используя классические формулы

$$M(y) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N y_j, \quad \sigma(y) = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N [y_j - M(y)]^2}{N-1}}, \quad (1.2)$$

где y_j – значение выходного параметра в j -й реализации РЭУ;

N – общее число реализаций РЭУ.

$M(y)$ обычно принимается за номинальное значение y . Основываясь на $\sigma(y)$, назначают допуск на выходной параметр.

Половину поля производственного рассеивания $\delta(y)$ выходного параметра y обычно определяют, пользуясь гипотезой о нормальном законе распределения y . В соответствии с «правилом трех сигм»

$$\delta(y) \approx 3\sigma(y). \quad (1.3)$$

При этом значение $\delta(y)$ гарантируется с вероятностью $P_r = 0,9973$. Если эта вероятность должна быть другой, то величину $\delta(y)$ корректируют с помощью коэффициента гарантируемого обеспечения допуска ρ [1, 3], зависящего от значения вероятности P_r (табл. 1.1).

Таблица 1.1

P_r	0,8	0,9	0,95	0,99	0,9973	0,999	0,9999
ρ	0,43	0,59	0,65	0,86	1,00	1,10	1,30

При необходимости от значения величины $\delta(y)$ можно перейти к значению половины поля рассеивания для относительной производственной погрешности выходного параметра:

$$\delta(\Delta y / y) = \delta(y) / M(y). \quad (1.4)$$

Производственный допуск $\Delta_{\text{пр}}$ на выходной параметр может быть назначен следующим образом:

$$\Delta_{\text{пр}} = \pm \delta(\Delta y / y). \quad (1.5)$$

Если значение $\Delta_{\text{пр}}$ устраивает заказчика, задача установления производственного допуска решена. В противном случае поступают одним из следующих способов в зависимости от того, что оправдано с экономической точки зрения:

1. Используют элементы с меньшими производственными допусками и процесс моделирования повторяют. Так поступают до тех пор, пока значение допуска, устанавливаемое по выражению (1.5), не будет отвечать требованиям.

2. В качестве $\Delta_{\text{пр}}$ записывают значение $\Delta_{\text{пр}}^{(\text{зак})}$, устраиваемое заказчиком, и определяют, какой процент РЭУ будет отвечать этому допуску. Для этого сначала находят величину

$$\rho = \frac{|\Delta_{\text{пр}}^{(\text{зак})}|}{\delta(\Delta y / y)},$$

где значение $\delta(\Delta y / y)$ получают по формуле (1.4) с использованием выражения (1.3). Искомый процент РЭУ определяется вероятностью P_r и находится путём решения следующего уравнения:

$$\rho = \frac{\arg \Phi \left(\frac{1 + P_r}{2} \right)}{3},$$

где $\arg \Phi(\dots)$ – аргумент табличной нормальной функции распределения (см. табл. П.1), для которого сама функция принимает значение, указанное в скобках.

И наконец, с учётом найденного процента РЭУ делают заключение о целесообразности отбора экземпляров, отвечающих требованию к значению $\Delta y/y$, и решают, как быть с экземплярами, не отвечающими требованию: индивидуальная доводка до нормы, продажа как «не кондиция» и т. п.

При реализации метода Монте-Карло используют как математические, так и физические модели.

В случаях, когда трудно получить модель вида (1.1) или же когда модель не отражает поведение РЭУ, используют физическую модель, в качестве которой обычно применяют макет РЭУ. При реализации метода Монте-Карло поступают так [1]. Диапазон производственного рассеивания каждого первичного параметра разбивается на 4–6 интервалов, и в качестве представителя интервала выбирают значение, близкое к середине интервала (рис. 1.2).

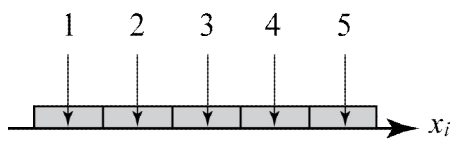


Рис. 1.2. Разбиение диапазона рассеивания первичного параметра на интервалы

Для получения случайной комбинации первичных параметров используются лишь эти 4–6 значений по каждому первичному параметру. Разбиение диапазона рассеивания первичного параметра на 4–6 интервалов вполне достаточно для решения практических задач [1, 2].

Для выполнения j -й реализации РЭУ значения первичных параметров, полученные для этой реализации РЭУ, устанавливают на физической модели и измеряют значение выходного параметра. Для таких элементов РЭУ, как резисторы и конденсаторы, осуществить изменение параметров можно путём параллельного или последовательного включения дополнительных элементов такого номинального значения, чтобы суммарное значение интересующего параметра примерно соответствовало значению, которое необходимо иметь при моделировании (точкам 1, 2, ..., 5 на рис. 1.2). Для некоторых элементов РЭУ (отдельные типы диодов и др.) осуществляют имитирование параметров, т. е. подключают к рассматриваемому элементу элементы другого функционального назначения, приводящие к изменению параметра интересующего элемента.

Если по каким-либо причинам воздействовать на изменение первичных параметров нельзя или не удаётся имитировать изменение, то осуществляют случайную замену элементов. Это относится к таким элементам, как транзисторы, интегральные микросхемы, импульсные трансформаторы и др.

1.3. Описание лабораторного макета

РЭУ, для которого выполняется физическое моделирование по методу Монте-Карло, – неинвертирующий источник опорного напряжения, электрическая схема которого приведена на рис. 1.3.

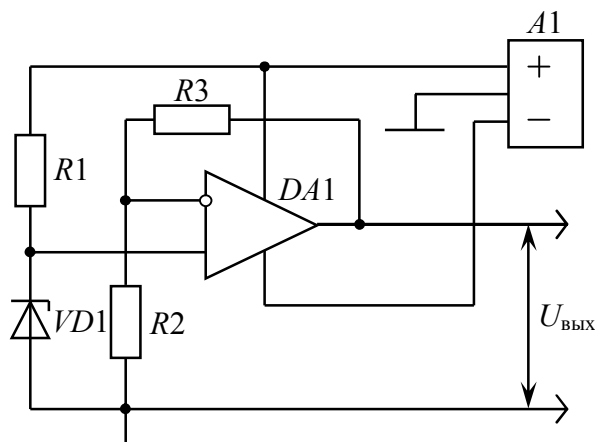


Рис. 1.3. Электрическая схема источника опорного напряжения

Физическая модель исследуемого РЭУ представлена лабораторным макетом. В качестве выходного параметра рассматривается выходное напряжение $U_{\text{ВЫХ}}$ исследуемого РЭУ, а в качестве первичных параметров – параметры элементов $R1-R3$, $VD1$, $DA1$ и напряжение источника питания $A1$.

Физическое моделирование выполняется путём дискретного изменения параметров элементов $R1-R3$, $VD1$ и напряжения источника питания $A1$ в пределах полей допусков. Поля допусков

первичных параметров разбиты на пять интервалов. Значения отклонений, соответствующие границам интервалов, а также значение «представителя» каждого интервала указаны в табл. 1.2.

При реализации метода Монте-Карло осуществить изменение или имитацию изменения параметров интегральной микросхемы $DA1$ на макете РЭУ чрезвычайно сложно, поэтому для неё предусмотрена случайная замена, для чего в макете установлено несколько (до десяти) экземпляров микросхем данного типа.

Таблица 1.2

Допуск, %	Границы интервалов и значение отклонения, соответствующее «представителю» интервала, %				
	-5...-3	-3...-1	-1...+1	+1...+3	+3...+5
± 5	-4	-2	0	+2	+4
± 10	-10...-6	-6...-2	-2...+2	+2...+6	+6...+10
	-8	-4	0	+4	+8
± 20	-20...-12	-12...-4	-4...+4	+4...+12	+12...+20
	-16	-8	0	+8	+16

Для измерения $U_{\text{ВЫХ}}$ рекомендуется использовать цифровой вольтметр.

1.4. Задание на экспериментальную часть лабораторной работы

При выполнении лабораторной работы рекомендуется соблюдать следующую последовательность:

1. Обосновать число реализаций N (значение N рекомендуется согласовать с преподавателем, но в любом случае $N \geq 50$).

2. Ознакомиться с физической моделью РЭУ – лабораторным макетом. Выяснить допуски первичных параметров: $R1 - R3$, $U_{\text{стаб}}$, $U_{\text{пит}}$. Используя опцию **Генерирование случайных чисел** в программе для ЭВМ **lab5-7** (папка **ТОКТиН**), определить случайные комбинации производственных отклонений

первичных параметров и номер заменяемой интегральной микросхемы для j -й реализации РЭУ ($j = 1, 2, \dots, N$). При возникновении трудностей в получении случайных чисел на ЭВМ следует обратиться к таблицам, приведённым в приложении. При использовании таблиц выбор чисел можно начинать с любой точки фрагмента таблицы и двигаться по строкам или столбцам.

Для ответа на вопрос, какие отклонения от номинальных должны иметь первичные параметры в j -й реализации, необходимо вначале выяснить, каковы предельные отклонения первичных параметров и каков закон распределения в пределах полей допусков параметров или, что то же самое, их относительных производственных погрешностей. Затем следует воспользоваться датчиком случайных чисел. Например, если допуск на параметр элемента имеет значение $\pm 10\%$ и может быть принята гипотеза о нормальном распределении параметра, то необходимо воспользоваться генератором случайных чисел, распределённых по нормальному закону в диапазоне $-10 \dots +10$. Получив случайное число и принимая во внимание, что всё поле допуска равномерно разбито на пять интервалов (см. табл. 1.2), можно указать дискретное значение отклонения, которое необходимо установить для данного параметра на модели (макете) в j -й реализации РЭУ.

Предположим, что первичный параметр имеет допуск $\pm 10\%$ и распределён по нормальному закону, а для j -й реализации РЭУ с помощью генератора случайных чисел получено значение $-4,9$. По табл. 1.2 определяем, что для рассматриваемого первичного параметра должно быть установлено дискретное значение, соответствующее интервалу $-6 \dots -2\%$, т. е. значение вблизи точки -4% . Номер экземпляра микросхемы DA1 определяется с помощью равномерно распределённых случайных чисел в диапазоне от 1 до числа, соответствующего количеству интегральных микросхем, используемых для замены.

3. Выполнить N реализаций РЭУ, используя его физическую модель.

j -я реализация состоит в установке на модели случайного сочетания производственных отклонений первичных параметров, полученного для этой реализации, и измерении значения выходного параметра $U_{\text{вых}}$ ($j = 1, 2, \dots, N$). Для интегральной микросхемы включается нужный номер экземпляра.

4. Выполнить с помощью программы **lab5-7** статистическую обработку всех N реализаций, просмотреть гистограммы распределения выходного параметра $U_{\text{вых}}$ при числе интервалов $k = 5-7$ и выбрать её рабочий вид. Выяснить правомерность использования гипотезы о нормальном распределении $U_{\text{вых}}$.

Из нескольких гистограмм, полученных при сопоставимом числе интервалов, лучшей является та, которая имеет меньшее число инверсий (кроме равномерного распределения). Инверсией считают смену закономерности изменения высот прямоугольников гистограммы.

5. Назначить производственный допуск на выходной параметр РЭУ с учётом результатов статистической обработки всех N реализаций. Если назначаемый допуск не отвечает требованию заказчика, то необходимо принять $\Delta_{\text{пр}} = \Delta_{\text{пр}}^{(\text{зак})}$ и выяснить, какой процент РЭУ сразу будет отвечать требованию.

Примечание. При выполнении п. 5 следует пользоваться утверждением, что, исходя из служебного назначения РЭУ, заказчика устраивает допуск $\Delta_{\text{пр}}^{(\text{зак})} = \pm 5\%$.

1.5. Содержание отчёта

1. Формулировка цели исследования.
2. Электрическая схема исследуемого РЭУ с указанием номинальных значений и предельных отклонений параметров элементов.

3. Результаты моделирования для j -й реализации: относительные отклонения параметров элементов (для элемента DA1 – номер экземпляра) и значения выходного параметра. Эту информацию привести в виде таблицы для первых пяти – семи реализаций РЭУ.

4. Результаты статистической обработки, полученные по данным всех N реализаций: среднее значение $M(y)$, СКО $\sigma(y)$ и гистограмму распределения выходного параметра $y \rightarrow U_{\text{вых}}$ при числе интервалов k из диапазона $k = 5 - 7$.

5. Обоснованное заключение о значении производственного допуска на выходной параметр, выраженном как размерностью выходного параметра, так и относительным отклонением в процентах. Если производственный допуск придётся устанавливать исходя из требований заказчика, то необходимо указать процент РЭУ, который сразу будет отвечать требованию к производственному допуску. Указанный процент РЭУ подтвердить расчётом.

6. Выводы по работе. Если производственный допуск устанавливался исходя из требований заказчика, то обязательно отразить вопрос о «судьбе» РЭУ, сразу не отвечающих требованию.

1.6. Контрольные вопросы

1. Что следует понимать под «допуском на выходной параметр РЭУ» и чем следует руководствоваться при его установлении?

2. В чём заключается суть метода Монте-Карло применительно к оценке отклонения выходного параметра РЭУ?

3. Как при использовании метода Монте-Карло получить случайные отклонения параметров элементов для той или иной реализации?

4. Что следует понимать под «индивидуальной доводкой экземпляров до нормы» и в каких случаях эта доводка производится?

5. Как необходимо поступить в том случае, если производственный допуск, назначенный с учётом найденного методом Монте-Карло отклонения, не устраивает заказчика?

ЛИТЕРАТУРА

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

2. Фролов, А. Д. Теоретические основы конструирования и надёжности радиоэлектронной аппаратуры / А. Д. Фролов. – М. : Высш. шк., 1970. – 488 с.

3. Фомин, А. В. Допуски в РЭА / А. В. Фомин, В. Ф. Борисов, В. В. Чермошенский. – М. : Сов. радио, 1973. – 129 с.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2 ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ВЛИЯНИЯ ПЕРВИЧНЫХ ПАРАМЕТРОВ

2.1. Цель работы

Определение коэффициентов влияния первичных параметров (параметров элементов и функционального узла РЭУ) экспериментально-расчётным способом и сравнение полученных значений со значениями, найденными чисто аналитическими методами.

2.2. Теоретические сведения

Если известна математическая модель вида

$$y = \varphi(x_1, x_2, \dots, x_n), \quad (2.1)$$

где y – выходной параметр;

x_1, x_2, \dots, x_n – первичные параметры;

n – общее число учитываемых первичных параметров,

то коэффициент влияния B_i i -го первичного параметра можно определить по выражению

$$B_i = \left[\frac{\partial y}{\partial x_i} \cdot \frac{x_i}{y} \right]_0, \quad (2.2)$$

где нижний индекс «ноль» указывает на то, что после дифференцирования и умножения на x_i / y в полученное выражение необходимо подставить средние (при симметричных допусках – номинальные) значения x_1, x_2, \dots, x_n , если в выражении они ещё останутся. Примеры определения B_i приведены в [1, с. 97, 127; 2, с. 46].

Если выходной параметр y может быть представлен в виде отношения

$$y = \frac{Q(x_1, \dots, x_n)}{H(x_1, \dots, x_n)} = \frac{Q}{H}, \quad (2.3)$$

где Q, H – многочлены, содержащие необязательно все x_i , причём их степень может быть любой, то коэффициент B_i может быть подсчитан по формуле

$$B_i = m \frac{Q(x_i)}{Q} - l \frac{H(x_i)}{H}, \quad (2.4)$$

где $Q(x_i)$ и $H(x_i)$ – части многочленов Q и H , содержащие только x_i ;

m, l – максимальные степени x_i соответственно в многочленах $Q(x_i)$ и $H(x_i)$.

С примером применения формулы (2.4) можно ознакомиться в [1, с. 128, пример 4.9; 2, с. 46, пример 4.9].

Коэффициенты влияния могут быть также определены методом приращения. В этом случае пользуются формулой [1]

$$B_i \approx \frac{\Delta y}{\Delta x_i} \cdot \frac{x_{i \text{ ном}}}{y_{\text{ном}}} = \frac{\varphi(x_{1 \text{ ном}}, \dots, x_{i \text{ ном}} + \Delta x_i, \dots, x_{n \text{ ном}}) - y_{\text{ном}}}{\Delta x_i} \cdot \frac{x_{i \text{ ном}}}{y_{\text{ном}}}, \quad (2.5)$$

где $x_{i \text{ ном}}, y_{\text{ном}}$ – соответственно средние (номинальные) значения i -го первичного и выходного параметров; $i = 1, \dots, n$;

Δx_i – задаваемое приращение (с учётом знака) i -го первичного параметра;

Δy – приращение выходного параметра с учётом знака после выполнения операции приращения x_i .

Точность определения B_i зависит от приращения Δx_i . При решении практических задач Δx_i составляет обычно не более 1–2 % среднего (номинального) значения x_i . Примеры применения метода см. [1, с. 129; 2, с. 47].

Для определения коэффициентов влияния первичных параметров **экспериментально-расчётным способом** математическая модель (2.1) не нужна. Используется экземпляр РЭУ или его макет. Метод заключается в том, что интересующему первичному параметру x_i дают малое приращение Δx_i (желательно 1–2 %, но в любом случае не более ± 5 %), принимая во внимание знак приращения. Остальные первичные параметры считают соответствующими средним (номинальным) уровням или же, если нет технических сложностей, устанавливают их средние значения. После выполнения операции приращения контролируют значение выходного параметра y . Коэффициент влияния первичного параметра x_i вычисляют по формуле

$$B_i = \frac{\Delta y}{\Delta x_i} \cdot \frac{x_{i \text{ нач}}}{y_{\text{нач}}}, \quad (2.6)$$

где $x_{i \text{ нач}}, y_{\text{нач}}$ – соответственно значения первичного параметра x_i и выходного параметра y до выполнения операции приращения.

Значение Δy определяют по формуле

$$\Delta y = \varphi(x_{1 \text{ нач}}, \dots, x_{i \text{ нач}} + \Delta x_i, \dots, x_{n \text{ нач}}) - y_{\text{нач}}. \quad (2.7)$$

Если все первичные параметры (включая параметр x_i) до выполнения операции приращения x_i устанавливались равными средним (номинальным) значениям, то справедливы равенства

$$x_{i \text{ нач}} = x_{i \text{ ном}}, \quad i = 1, \dots, n; \quad y_{\text{нач}} = y_{\text{ном}}.$$

2.3. Описание лабораторного макета

Исследуемым РЭУ является неинвертирующий источник опорного напряжения. Его электрическая схема приведена на рис. 2.1.

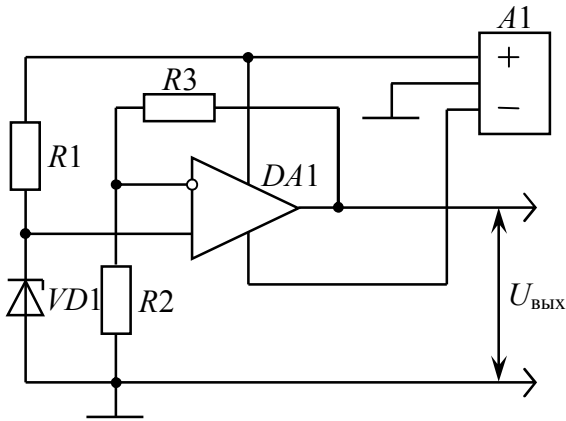


Рис. 2.1. Электрическая схема источника опорного напряжения

В качестве выходного параметра у рассматривается выходное напряжение $U_{\text{вых}}$ исследуемого РЭУ, в качестве вичных параметров – сопротивления резисторов $R1-R3$, напряжение стабилизации $U_{\text{ст}}$ элемента $VD1$ и напряжение питания $U_{\text{пит}}$ источника питания $A1$.

Исследуемое РЭУ представлено лабораторным макетом. Для наглядности на передней панели макета приведена электрическая схема устройства с указанием номинальных значений первичных параметров, значений допусков этих параметров и другой необходимой информации.

2.4. Задание на экспериментальную часть лабораторной работы

При выполнении работы рекомендуется соблюдать следующую последовательность:

1. Ознакомиться с лабораторным макетом: выяснить номинальные значения первичных параметров, возможные пределы отклонения от этих значений, порядок (схему) контроля приращения первичных параметров, способ измерения выходного параметра.

2. Получить, используя лабораторный макет, данные, необходимые для последующего расчёта по формуле (2.6) коэффициентов влияния первичных параметров – сопротивлений резисторов $R1-R3$, напряжения стабилизации $U_{\text{ст}}$ элемента $VD1$ и напряжения питания $U_{\text{пит}}$ источника питания $A1$.

В качестве значений x_i нач до выполнения операции приращения значений x_i использовать значения x_i ном, в качестве $y_{\text{нач}}$ – значение $y_{\text{ном}}$.

Рекомендуемая последовательность получения экспериментальных данных:

- установить номинальные значения всех x_i и измерить значение $y_{\text{ном}}$;
- для рассматриваемого x_i сделать малое приращение Δx_i , приняв во внимание его знак;
- измерить значение y , соответствующее приращению Δx_i .

3. Определить по формуле (2.6) значения коэффициентов влияния первичных параметров. Использовать для определения приращений Δy , подставляемых в формулу (2.6), выражение (2.7).

4. Определить, принимая во внимание математическую модель РЭУ, коэффициенты влияния первичных параметров $R1-R3$, $U_{\text{ст}}$ и $U_{\text{пит}}$ двумя способами: по формуле (2.2) или (2.4) и методом приращений с использованием выражения (2.5).

5. Сравнить значения коэффициентов влияния, полученные при выполнении пп. 3 и 4, объяснить расхождение значений.

6. Написать отчёт по работе.

Примечание. В качестве математической модели РЭУ рассматривать выражение, приводимое в технической литературе:

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{ст}} \frac{R2 + R3}{R2} \quad \text{при} \quad U_{\text{пит}} = \text{const.} \quad (2.8)$$

2.5. Содержание отчёта

1. Формулировка цели работы.
 2. Электрическая схема исследуемого РЭУ с указанием номинальных значений и предельных отклонений первичных параметров.
 3. Математическая модель РЭУ.
 4. Экспериментальные данные, необходимые для определения коэффициентов влияния экспериментально-расчётным способом.
 5. Значения коэффициентов влияния, полученные экспериментально-расчётным и аналитическим способами.
 6. Выводы по работе с обязательным объяснением причин расхождения значений коэффициентов, полученных разными способами.
- Ответ на пп. 4, 5 следует представить в виде табл. 2.1.

Таблица 2.1

Первичный параметр	Значение $x_{i \text{ ном}}$ [разм]	Приращение Δx_i [разм]	Значение u с учётом приращения Δx_i [разм]	$u_{\text{ном}}$ [разм]	Δu , найденное по выражению (2.7), [разм]	B_i , полученное экспериментально-расчётным способом	B_i , полученное аналитическим способом (методом)	
							по формуле (2.2) или (2.4)	по выражению (2.5) или (2.6)
$x_i \rightarrow R1$
...

Примечание. Запись [разм] в табл. 2.1 означает размерность приводимой величины.

2.6. Контрольные вопросы

1. Для решения каких проектных задач необходимо знать коэффициенты влияния первичных параметров?
2. Какие основные методы определения коэффициентов влияния первичных параметров вы знаете?
3. В чём заключается суть экспериментально-расчётного способа оценки коэффициентов влияния первичных параметров?
4. Какими исходными данными необходимо располагать для определения коэффициентов влияния первичных параметров?

ЛИТЕРАТУРА

1. Боровиков, С. М. Теоретические основы конструирования, технологии и надёжности : учеб. для студ. инж.-техн. спец. вузов / С. М. Боровиков. – Минск : Дизайн ПРО, 1998. – 336 с.
2. Боровиков, С. М. Теоретические основы конструирования, технологии и надёжности. Сборник задач : учеб. пособие для вузов / С. М. Боровиков, А. В. Погребняков. – Минск : БГУИР, 2001. – 124 с.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3

ИССЛЕДОВАНИЕ ОТКЛОНЕНИЙ ВЫХОДНОГО ПАРАМЕТРА РЭУ МЕТОДОМ МОНТЕ-КАРЛО С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

3.1. Цель работы

Исследование вероятностного рассеивания выходного параметра РЭУ с учётом производственных погрешностей параметров элементов и назначение на основе этого производственного допуска на выходной параметр.

3.2. Теоретические сведения

При использовании математического моделирования методом Монте-Карло исходными данными должны быть: вероятностное описание первичных параметров x_1, x_2, \dots, x_n или их относительных производственных погрешностей $\Delta x_1/x_1, \Delta x_2/x_2, \dots, \Delta x_n/x_n$ и хотя бы приближенный вид математической модели

$$y = \varphi(x_1, x_2, \dots, x_n), \quad (3.1)$$

где y – выходной параметр;

x_1, x_2, \dots, x_n – первичные параметры;

n – общее число учитываемых первичных параметров.

При моделировании РЭУ (процесса) методом Монте-Карло можно выделить следующие этапы [1]:

1. Получение случайной комбинации значений первичных параметров x_1, x_2, \dots, x_n для j -й реализации процесса, $j = 1, 2, \dots, N$, где N – общее число реализаций процесса. Это осуществляется с учётом средних (номинальных) значений и допусков первичных параметров, а также законов их распределения в пределах полей допусков.

Реализации первичных параметров получают, используя характеристики (параметры) законов их распределения, например, при нормальном законе это m и σ , при равномерном – a и b , при экспоненциальном – λ [1]. Поэтому, чтобы смоделировать первичный параметр, распределённый по тому или иному закону, надо вначале выявить характеристики

характеристики закона распределения, которые определённым образом связаны со средним значением $M(x)$ и средним квадратическим отклонением (СКО) $\sigma(x)$ рассматриваемого параметра x (табл. 3.1).

Таблица 3.1

Закон распределения	Параметры закона	Связь параметров закона с $M(x)$ и $\sigma(x)$	Определение $\sigma(x)$ по значению $\delta(x)$
Нормальный	m, σ	$m = M(x),$ $\sigma = \sigma(x)$	$y(x) \approx \frac{\delta(x)}{3}$
Равномерный	a, b	$a = x_{iн}, b = x_{iв};$ $M(x) = \frac{x_{iн} + x_{iв}}{2}$	$y(x) = \frac{\delta(x)}{\sqrt{3}}$

2. Подставление полученной случайной комбинации значений x_1, x_2, \dots, x_n в математическую модель вида (3.1) и определение значения y для j -й реализации РЭУ.

3. Проведение N реализаций РЭУ и получение ряда значений y_1, y_2, \dots, y_N . Требуемое число реализаций N может быть определено по формуле [1, 2]

$$N \geq \frac{4[y(y)]^2}{\Delta^2}, \quad (3.2)$$

где $\sigma(y)$ – СКО выходного параметра;

Δ – заданная (до начала моделирования) абсолютная погрешность определения среднего значения выходного параметра.

СКО $\sigma(y)$ вначале определяют приближённо по результатам некоторого числа реализаций РЭУ ($N \approx 1000$), затем по мере накопления числа реализаций его уточняют. Когда условие (3.2) выполняется, моделирование заканчивают.

4. Статистическая обработка ряда y_1, y_2, \dots, y_N . Используют классические формулы

$$M(y) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N y_j; \quad y(y) = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N [y_j - M(y)]^2}{N-1}}, \quad (3.3)$$

где y_j – значение выходного параметра в j -й реализации РЭУ;

N – общее число реализаций РЭУ.

Среднее значение $M(y)$ обычно принимается за номинальное значение выходного параметра. Основываясь на значениях СКО $\sigma(y)$, назначают допуск на выходной параметр (см. лаб. работу №1, с. 6–12).

3.3. Исследуемое РЭУ и его математическая модель

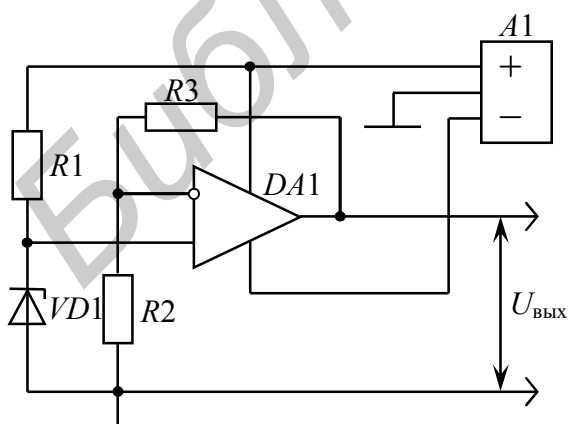


Рис. 3.1. Электрическая схема источника опорного напряжения

Исследуемым РЭУ является неинвертирующий источник опорного напряжения, электрическая схема которого приведена на рис. 3.1.

В качестве выходного параметра y рассматривается выходное напряжение $U_{\text{ВЫХ}}$ (см. рис. 3.1), в качестве первичных параметров – сопротивления резисторов $R1$ – $R3$, напряжение стабилизации $U_{\text{СТ}}$ элемента $VD1$ и напряжение питания $U_{\text{ПИТ}}$ источника питания $A1$.

Математической моделью РЭУ является уравнение регрессии, построенное для выходного параметра $U_{\text{вых}}$, или выражение, приводимое в технической литературе:

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{ст}} \frac{R2 + R3}{R2}. \quad (3.4)$$

3.4. Задание на экспериментальную часть лабораторной работы

При выполнении работы рекомендуется соблюдать следующую последовательность:

1. Ознакомиться со схемой исследуемого РЭУ.

2. Уточнить математическую модель РЭУ: выходной параметр, первичные параметры, их номинальные значения и производственные допуски.

При использовании в качестве математической модели выражения (3.4) следует воспользоваться данными табл. 3.2.

3. Подготовить, руководствуясь табл. 3.1, информацию, необходимую для получения на ЭВМ случайных реализаций первичных параметров.

4. Определить, пользуясь формулой (3.2), требуемое число реализаций РЭУ.

Примерное значение $\sigma(y)$ определяется по результатам обработки начального числа (N_1) реализаций. На требуемое число реализаций N заметно влияет допустимая ошибка Δ (см. формулу (3.2)). Значение Δ , как правило, не известно. Его выбор может быть сделан следующим образом. Принимая во внимание функциональное назначение РЭУ и физический смысл выходного параметра $y \rightarrow U_{\text{вых}}$, определяют, какое значение половины поля допуска $\delta(y)$, устанавливаемое на этот параметр, может быть приемлемым для практики. В качестве Δ следует взять такое значение, которое как минимум в 20 ... 100 раз меньше $\delta(y)$:

Таблица 3.2

Элемент электрической схемы	Первичный параметр	Номинальное значение и допуск	Закон распределения
R2	R2	10 кОм \pm 10 %	Устанавливается путём анализа
R3	R3	5,1 кОм \pm 5 %	То же
VD1	$U_{\text{ст}}$	3,3 В \pm 10 %	Нормальный

$$\Delta \leq (0,01 \dots 0,05) \delta(y).$$

Значение $\delta(y)$ принять исходя из производственного допуска на выходной параметр $U_{\text{вых}}$, приемлемого для практики: $\Delta_{\text{пр}} = \pm 5 \%$.

5. Выполнить, используя программу моделирования РЭУ на ЭВМ (**lab5-7** в папке **ТОКТИН**), требуемое число реализаций. Общее число реализаций должно быть не менее, чем значение N , найденное по формуле (3.2) в п. 4.

6. Выполнить с помощью программы **lab5-7** статистическую обработку всех N реализаций РЭУ: получить значения $M(y)$ и $\sigma(y)$, просмотреть гистограммы распределения выходного параметра $y \rightarrow U_{\text{вых}}$ при сопоставимом числе интервалов и выбрать её рабочий вид. Определить, пользуясь критерием Пирсона (критерием согласия χ^2), правомерность использования на практике гипотезы о нормальном законе распределения выходного параметра.

При числе наблюдений выходного параметра (реализаций РЭУ), превышающем значение $N > 500-1000$, количество интервалов k , используемых для построения гистограммы, примерно берут из диапазона $k = 15-25$.

Из нескольких гистограмм, полученных при сопоставимом числе интервалов, лучшей является та, которая имеет меньшее число инверсий (кроме равномерного распределения). Инверсией считают смену закономерности изменения высот прямоугольников гистограммы.

7. С учётом значения $\sigma(y)$, найденного в п. 6, и гипотезы о нормальном распределении выходного параметра $y \rightarrow U_{\text{вых}}$ определить половины полей производственного разброса $\delta(y)$ и $\delta(\Delta y/y)$, соответствующие вероятности 0,9973.

8. Назначить производственный допуск на выходной параметр РЭУ. Если назначаемый допуск не отвечает требованию заказчика, то необходимо принять $\Delta_{\text{пр}} = \Delta_{\text{пр}}^{(\text{зак})}$ и выяснить процент РЭУ отвечающий требованию.

Этот пункт выполняется только в случае указания преподавателя.

При выполнении пункта пользоваться тем, что, исходя из служебного назначения РЭУ, заказчика устраивает допуск $\Delta_{\text{пр}}^{(\text{зак})} = \pm 5\%$.

Для определения процента РЭУ, сразу отвечающих требованию к производственному допуску на выходной параметр, следует воспользоваться указаниями лабораторной работы №1 (см. с. 6-12).

9. Определить с учётом производственных допусков первичных параметров аналитическим вероятностным методом характеристику $\delta(\Delta y/y)$, соответствующую вероятности 0,9973. Эта часть задания лабораторной работы может выполняться во внеурочное время.

Приёмы определения производственных допусков на выходные параметры вероятностным методом подробно рассмотрены в [1-3].

10. Сравнить значения характеристик $\delta(\Delta y/y)$, полученных методом Монте-Карло с использованием математического моделирования РЭУ и аналитическим вероятностным методом. Объяснить причину расхождения.

11. Написать отчёт по работе.

3.5. Содержание отчёта

1. Формулировка цели исследования.

2. Электрическая схема исследуемого РЭУ, его математическая модель с указанием номинальных значений и предельных отклонений первичных параметров.

3. Информация, используемая для моделирования на ЭВМ случайных реализаций первичных параметров. Результаты представить в виде табл. 3.3.

Таблица 3.3

Элемент электрической схемы	Первичный параметр	Номинальное значение и допуск	Закон распределения	Параметры закона распределения
...

4. Результаты математического моделирования РЭУ для j -й реализации: случайные значения первичных параметров и значение выходного параметра, полученное с помощью математической модели РЭУ для этой реализации. Информацию представить в виде табл. 3.4 для первых пяти реализаций РЭУ.

5. Результаты статистической обработки на ЭВМ всех N реализаций РЭУ: среднее значение $M(y)$ и СКО $\sigma(y)$ выходного параметра, а также гистограмму его распределения.

Номер реализации РЭУ	Значения первичных параметров в j -й реализации			Значение выходного параметра, соответствующего j -й реализации, [разм]
	$x_1 \rightarrow R2$, [разм]	...	$x_n \rightarrow \dots$, [разм]	
1
...

6. Обоснованное заключение о значении производственного допуска на выходной параметр, выраженное как размерностью выходного параметра, так и относительным отклонением в процентах. Если производственный допуск придётся устанавливать исходя из требований заказчика, то необходимо указать процент РЭУ, который сразу будет отвечать требованию к производственному допуску. Указанный процент РЭУ подтвердить расчётом.

Примечание. Этот пункт приводится только в случае выполнения п. 8 рубрики «3.4. Задание на экспериментальную часть лабораторной работы».

7. Значения характеристик $\delta(y)$ и $\delta(\Delta y/y)$ выходного параметра $y \rightarrow U_{\text{вых}}$, найденных с использованием результатов математического моделирования РЭУ, и значение характеристики $\delta(\Delta y/y)$, рассчитанной вероятностным методом. Значения характеристик должны соответствовать вероятности 0,9973.

8. Выводы по работе. В выводах обязательно объяснить причины расхождения характеристик $\delta(\Delta y/y)$, полученных методом Монте-Карло с использованием математического моделирования РЭУ и аналитическим вероятностным методом.

3.6. Контрольные вопросы

1. В чём состоит отличие математического моделирования от физического в методе Монте-Карло?

2. Какие основные этапы можно выделить в процессе моделирования РЭУ методом Монте-Карло?

3. Что принимают во внимание, выполняя математическое моделирование первичных параметров?

4. Как, используя результаты математического моделирования, находят основные числовые характеристики исследуемых параметров?

ЛИТЕРАТУРА

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

2. Фролов, А. Д. Теоретические основы конструирования и надёжности радиоэлектронной аппаратуры / А. Д. Фролов. – М. : Высш. шк. 1970. – 488 с.

3. Боровиков, С. М. Теоретические основы конструирования, технологии и надёжности. Сборник задач : учеб. пособие для вузов / С. М. Боровиков, А. В. Погребняков. – Минск : БГУИР, 2001. – 124 с.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЁЖНОСТИ РЭУ МОДЕЛИРОВАНИЕМ НА ЭВМ ОТКАЗОВ ЭЛЕМЕНТОВ

4.1. Цель работы

Определение показателей надёжности РЭУ моделированием на ЭВМ отказов элементов.

4.2. Теоретические сведения

Продолжительность работы изделия (элемента, устройства и т. д.), измеренную 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 или в циклах функционирования.

В теории и практике надёжности часто интересуются **наработкой** изделий **до отказа**. В качестве наработки элементов до отказа рассматривается суммарное время (без учёта перерывов) с момента начала эксплуатации до момента возникновения отказа. В этом случае наработку до отказа обычно называют временем безотказной работы или временем до отказа.

Известно [1], 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 – описания отказов) наиболее часто используются следующие законы: **экспоненциальный; нормальный; Вейбулла** (табл. 4.1).

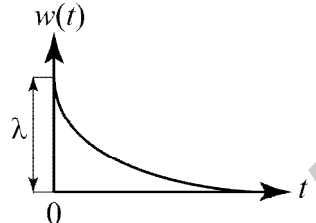
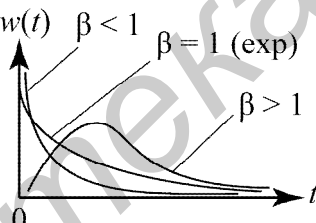
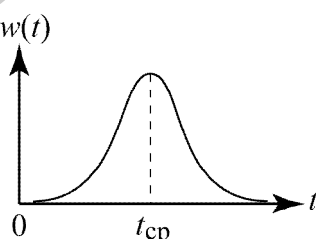
Экспоненциальный закон долгое время использовался для описания времени до отказа большинства элементов РЭУ. В последнее время установлено, что время до отказа ряда элементов лучше описывается другими законами – нормальным, Вейбулла, логарифмически нормальным.

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

При $\beta = 1$ распределение Вейбулла (см. табл. 4.1) превращается в экспоненциальное распределение, при $\beta > 2-3$ – приближается к нормальному закону.

Отказы некоторых типов элементов хорошо описываются **нормальным законом распределения**. Так как наработка до отказа – 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).

Таблица 4.1

Закон распределения времени до отказа	Выражение функции плотности распределения и связь параметров закона распределения с числовыми характеристиками времени до отказа: $M(t)$ и $\sigma(t)$	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	$w(t) = \lambda e^{-\lambda t}; \quad t \geq 0,$ где λ – параметр распределения. $\lambda = \frac{1}{M(t)}; \quad \lambda = \frac{1}{\sigma(t)}.$ Свойство распределения: $M(t) = \sigma(t)$		$P(t_3) = e^{-\lambda t_3}$	$T_{cp} = \frac{1}{\lambda}$
Вейбулла	$w(t) = \rho \beta t^{\beta-1} e^{-\rho t^\beta}; \quad t \geq 0,$ 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	$w(t) = \frac{1}{\sigma_t \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(t - t_{cp})^2}{2\sigma_t^2}\right]; \quad t \geq 0,$ где t_{cp}, σ_t – параметры распределения. $\begin{cases} t_{cp} = M(t) \\ \sigma_t = \sigma(t) \end{cases}$		$P(t_3) = \Phi\left(\frac{t_{cp} - t_3}{\sigma_t}\right),$ где $\Phi(\dots)$ – функция распределения стандартного нормального распределения ($m = 0, \sigma = 1$)	$T_{cp} \approx t_{cp}$

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

При значении $m/\sigma > 2$, 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.

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 подчинена логарифмически нормальному закону.

Зная плотность распределения времени до отказа $w(t)$, можно определить вероятность безотказной работы элемента для любого заданного интервала времени t_3 . Из рис. 4.1 видно, что эта вероятность $P(t_3)$ численно равна площади под кривой $w(t)$, находящейся правее точки $t = t_3$ (заштрихованная область), поэтому можно записать

$$P(t_3) = \int_{t_3}^{\infty} w(t) dt. \quad (4.1)$$

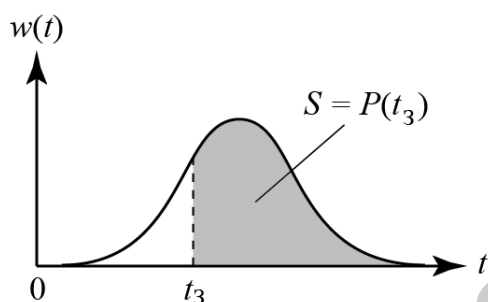


Рис. 4.1. Определение вероятности безотказной работы за время t_3

Применяя выражение (4.1), можно получить формулы для определения $P(t_3)$ для любых законов распределения времени до отказа (см. табл. 4.1).

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

$$T_{\text{ср}} = \int_0^{\infty} P(t) dt. \quad (4.2)$$

С учётом выражения (4.2) получены формулы для определения $T_{\text{ср}}$ для основных законов распределения времени до отказа (см. табл. 4.1).

Интенсивность отказов $\lambda(t)$ для любого времени t может быть определена как отношение

$$\lambda(t) = \frac{w(t)}{P(t)}. \quad (4.3)$$

При решении практических задач по оценке показателей надёжности РЭУ аналитические расчёты могут оказаться весьма трудоёмкими либо ими вообще нельзя воспользоваться. В этих случаях поставленные задачи удобно решать моделированием отказов элементов на ЭВМ.

Рассмотрим следующий пример. Допустим 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

$$T_{\text{ср}} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N t_j. \quad (4.4)$$

Вероятность безотказной работы за заданное время t_3 находят следующим образом:

$$P(t_3) = \frac{N - N(t_3)}{N}, \quad (4.5)$$

где $N(t_3)$ – количество реализаций РЭУ, для которых оказалось $t_j < t_3$.

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 определяется 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 [1, с. 292–293, рис. 9.12].

Программа моделирования надёжности РЭУ на ЭВМ позволяет получать случайные значения наработок до отказа, отвечающих следующим законам распределения: экспоненциальному, нормальному, Вейбулла. Для получения последовательности чисел (времени до отказа), распределённых по указанным законам, используются функциональные преобразования последовательности стандартных равномерно распределённых случайных чисел в диапазоне $(0 \dots 1)$, генерируемых с помощью встроенной функции **random** (табл. 4.2).

Таблица 4.2

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	$m + \sigma \left(\sum_{i=1}^{12} r_i - 6 \right)$

В табл. 4.2 символом r чены случайные стандартные мерно распределенные числа в диапазоне $(0...1)$.

Для исследования влияния параметров законов распределения на показатели надёжности элемента необходимо принять, что в РЭУ содержится всего один элемент ($n = 1$).

Лучшая наглядность процесса отказа элементов на экране дисплея обеспечивается при $N = 100$. Поэтому

для режима демонстрации моделирования следует использовать значение $N = 100$. При выполнении лабораторной работы для повышения достоверности показателей надёжности, определяемых по результатам моделирования, число реализаций N следует брать не менее 1000.

4.3. Задание на экспериментальную часть

При выполнении работы рекомендуется соблюдать следующую последовательность:

1. Получить, используя моделирование на ЭВМ отказов элементов (программа **lab1** в папке **NRES**), данные, на основании которых:

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

1.2. 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 .

1.3. Определить показатели T_{cp} , T_γ и $P(t_3)$ для РЭУ в случае, если все элементы имеют экспоненциальный закон распределения времени до отказа.

1.4. Определить показатели T_{cp} , T_γ и $P(t_3)$ для РЭУ в случае, если элементы имеют различные законы распределения времени до отказа.

Таблица 4.3

Пункт исследования	Рекомендации по выбору условий моделирования для рабочих условий применения элементов
1	Диапазон λ : $10^{-4} \dots 10^{-2}$ 1/ч
2	Элемент из первой партии: $t_{cp} = 10000-12000$ ч; $\sigma_t = 4000$ ч; элемент из второй партии: $t_{cp} = 6000-8000$ ч; $\sigma_t = 300$ ч; $t_3 = 5000$ ч
3	Число элементов $n = 3$; диапазон λ : $(1 \dots 5) \cdot 10^{-5}$ 1/ч; $t_3 = 1000$ ч; $\gamma = 90\%$
4	Число элементов $n = 3$; $t_3 = 1000$ 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

При выполнении пп. 1.1 – 1.4 следует руководствоваться рекомендациями табл. 4.3 и указаниями программы для ЭВМ *lab1*.

2. Выполнить аналитический расчёт показателей надёжности T_{cp} , T_γ и $P(t_3)$ для условий моделирования, выбранных по табл. 4.3 при выполнении пп. 1.3, 1.4 (см. раздел 1 задания), используя один из источников [1, 2]. В случае нехватки времени на аудиторных занятиях раздел 2 задания можно выполнять дома.

3. Написать отчёт по работе.

4.4. Содержание отчёта

1. Формулировка цели работы.

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

3. График зависимости $T_{cp} = f(\lambda)$, построенный по данным таблицы, приводимой в п. 2. При построении графика необходимо на координатную сетку нанести экспериментальные точки и провести **аппроксимирующую линию**, математическое выражение которой должно быть получено по программе *srkv5* (папка **NRES**) 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 времени $t_3 = 5000$ ч.

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

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

Ответы на пп. 5, 6 следует представить в виде табл. 4.4.

Таблица 4.4

Элемент	Закон распределения времени до отказа	Параметры закона распределения	Значение T_{cp} РЭУ, полученное		Значение $T_\gamma=90\%$ РЭУ, полученное		Значение $P(t_3)$ РЭУ, полученное	
			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.

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

ЛИТЕРАТУРА

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

2. Боровиков, С. М. Теоретические основы конструирования, технологии и надёжности. Сборник задач : учеб. пособие для вузов / С. М. Боровиков, А. В. Погребняков. – Минск : БГУИР, 2001. – 124 с.

3. Надёжность в технике, основные понятия. Термины и определения. ГОСТ 27.002–89. – М. : Издательство стандартов, 1990. – 24 с.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №5

ПРОВЕРКА ПРАВИЛЬНОСТИ ВЫБОРА ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРОННОГО КАСКАДА ПО КОЭФФИЦИЕНТАМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ

5.1. Цель работы

Проверка правильности выбора элементов с точки зрения регламентированных максимальных значений коэффициентов их электрической нагрузки. Элемент считается выбранным правильно, если его номинальная (допустимая по ТУ или другому нормативно-техническому документу) эксплуатационная энергетическая нагрузка такова, что коэффициент электрической нагрузки при работе элемента в составе электронного каскада не превышает регламентированного значения.

5.2. Теоретические сведения

Степень энергетической нагруженности элементов РЭС характеризуется коэффициентами электрической нагрузки, кратко – коэффициентом нагрузки. Количественно коэффициент нагрузки K_H подсчитывается с помощью выражения

$$K_H = \frac{F_{\text{раб}}}{F_{\text{ном}}}, \quad (5.1)$$

где $F_{\text{раб}}$ – значение энергетической (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 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].

Пример 1. Через коллекторную цепь транзистора протекает ток $I_K = 10$ мА (рис. 5.1). 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 коэффициента нагрузки будет иметь место для выбранного резистора.

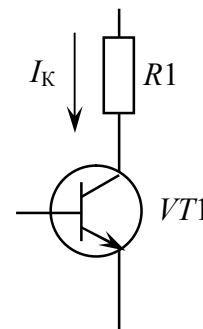


Рис. 5.1. Коллекторная цепь транзистора

Решение:

1) в качестве нагрузки F для резисторов используют мощность рассеивания P . Поэтому согласно формуле (5.1)

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

2) из условия примера видно, что $P_{\text{ном}} = 0,25$ Вт;

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

$$P_{\text{раб}} = I_K^2 \cdot R1 = 10^2 \cdot 10^{-6} \cdot 1000 = 0,1 \text{ Вт};$$

4) определяем коэффициент нагрузки резистора:

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

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

Для многих элементов с точки зрения безотказности 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 $K_H^{(P)}$.

Априорное ограничение нагрузки элементов РЭС

С точки зрения надёжности недопустимо использовать элементы при значении коэффициента нагрузки, превышающем единицу – даже хотя бы по одному из параметров электрического режима. С целью повышения надёжности РЭС регламентируются предельно допустимые коэффициенты нагрузки элементов. Причём, в общем случае для разных элементов и различных классов РЭС регламентируемые предельно допустимые значения коэффициентов нагрузки могут различаться. Однако в любом случае указанные значения не будут превышать единицы.

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

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

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

где $\lambda(v)$ – интенсивность отказов элемента с учётом окружающей температуры и коэффициента электрической нагрузки.

Поэтому регламентированный предельный коэффициент электрической нагрузки устанавливают в той области, где кривая интенсивности отказов $\lambda(v)$ при максимально возможной для данного РЭС окружающей температуре начинает круто возрастать. Например, для пленочных резисторов по результатам опытных данных кривые интенсивностей отказов имеют вид, приведённый на рис. 5.2.

Из рис. 5.2 видно, что при средней температуре внутри блоков (стоек, шкафов) РЭС порядка $50 \dots 70 \text{ }^\circ\text{C}$ наблюдается резкое увеличение интенсивности отказов резисторов при $K_H \approx 0,4 \dots 0,6$. Поэтому с точки зрения надёжности коэффициент нагрузки резисторов не должен превышать значения $K_H = 0,4 \dots 0,6$.

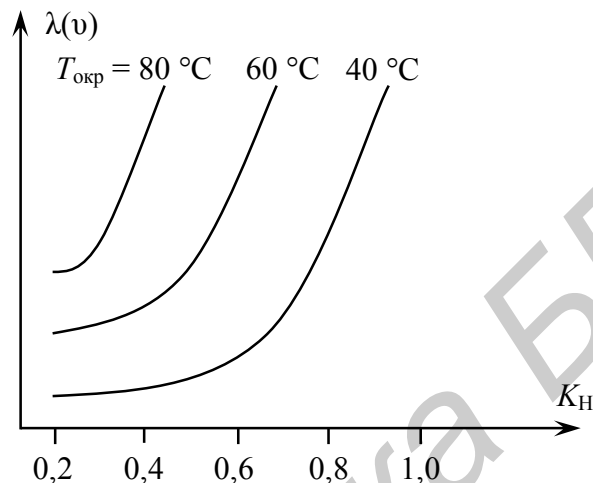


Рис. 5.2. Зависимость интенсивности отказов $\lambda(v)$ от коэффициента электрической нагрузки для пленочных резисторов

Указанный принцип выбора предельных электрических нагрузок применяется для всех элементов РЭС, по которым имеются опытные данные. Например, для наземной (полевой, переносной, автомобильной) и судовой аппаратуры следует использовать регламентацию предельных энергетических нагрузок в соответствии с табл. 5.1 [2].

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 обычно определялись с учётом номинальных значений параметров всех элементов, питающих напряжений и электрических режимов. Обозначим коэффициенты электрической нагрузки, найденные с учётом номинальных режимов, через $K_{H \text{ ном } i}$. Несмотря на то что для всех элементов обеспечивались условия $K_{H \text{ ном } i} < K_{H \text{ пред } i}$ (где индекс i означает i -й элемент), реальные коэффициенты нагрузки для отдельных элементов оказывались заметно выше указанных в табл. 5.1. Происходило это в результате неудачного сочетания (комбинации) отклонений от номинала параметров элементов и источников питания. Сказанное иллюстрируется примером 2.

Таблица 5.1

Элементы	Параметр нагрузки	$K_{Н\text{ пред}}$
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), гнёзда штепсельные	Напряжение на контакте	0,3
	Ток через контакт	0,5

Пример 2. На рис. 5.3 приведен фрагмент электрической схемы.

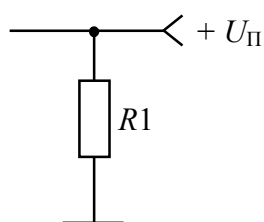


Рис. 5.3. Фрагмент электрической схемы

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

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

Нетрудно определить, что коэффициент нагрузки резистора для номинального электрического режима $K_{\text{Н ном}} \approx 0,47$. По табл. 5.1 предельное значение коэффициента нагрузки для постоянных резисторов $K_{\text{Н пред}} = 0,5$. Условие $K_{\text{Н ном}} < K_{\text{Н пред}}$ выполняется.

Можно убедиться, что за счёт неблагоприятного сочетания отклонений параметров резистора $R1$ и источника питания $U_{\text{П}}$ реальный коэффициент нагрузки может оказаться заметно выше и не будет отвечать требованию табл. 5.1. Обозначим коэффициент нагрузки, соответствующий наихудшему (экстремальному) случаю, через $K_{\text{Н max}}$. Определим это значение. Мощность, рассеиваемая резистором в экстремальном режиме, определится как

$$P_{\text{раб max}} = \frac{U_{\text{П max}}^2}{R1_{\text{min}}},$$

т. е. экстремальному режиму соответствуют значения $U_{\text{П}} = U_{\text{max}}$ и $R1 = R1_{\text{min}}$.

$$P_{\text{раб max}} = \frac{(10+1)^2}{(430-43)} \approx 0,313 \text{ Вт}, \quad K_{\text{Н max}} = \frac{P_{\text{раб max}}}{P_{\text{НОМ}}} = \frac{0,313}{0,5} \approx 0,63,$$

что выше регламентируемой предельной нагрузки для резисторов (см. табл. 5.1).

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

В инженерной практике широко используют приближённые методы расчёта, позволяющие определить искомые величины с погрешностью, не превышающей 15...20 %. Такая погрешность достаточна в большинстве практических случаев.

5.3. Объект исследования. Методика проведения исследований

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

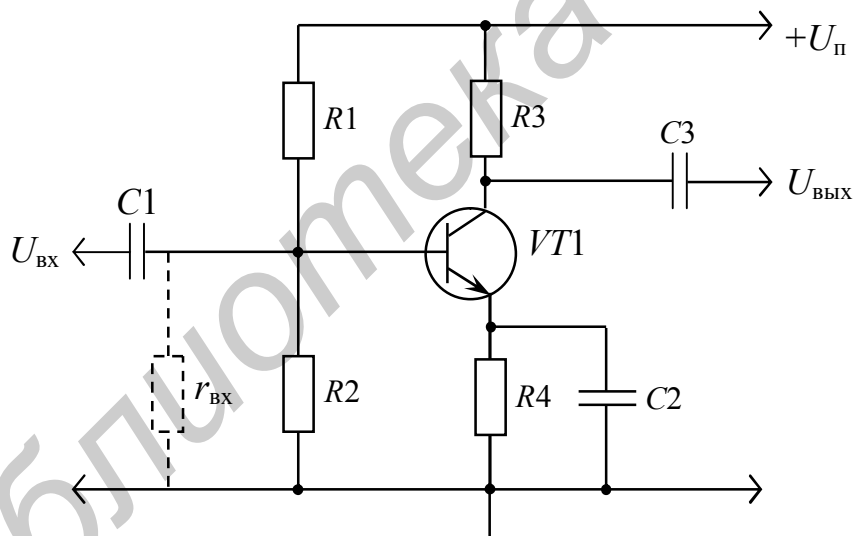


Рис. 5.4. Электрическая принципиальная схема НЧ усилительного каскада

Методика проведения исследований поясняется ниже на примере простейшего НЧ усилительного каскада, электрическая принципиальная схема которого приведена на рис. 5.4.

Тип транзистора, номинальные значения параметров элементов, значения допусков на параметры, а также номинальные (допустимые по ТУ) эксплуатационные электрические характеристики элементов, напряжение источника питания $U_{П}$ и допуск на него указаны в табл. 5.2.

Варианты заданий для выполнения экспериментальной части

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

Для определения максимальных коэффициентов нагрузки $K_{H \max}$, соответствующих экстремальному режиму работы элементов, используется ЭВМ. 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. 5.4) учитывается эквивалентное входное сопротивление цепи база – эмиттер ($r_{вх}$), включённое параллельно резистору $R2$:

$$r_{вх} = r_6 + (1 + \beta)R4 \approx (1 + \beta) R4, \quad (5.2)$$

где r_6 – сопротивление тела базы;

β – коэффициент усиления транзистора по току.

Выражение (5.2) использовано при расчёте на ЭВМ экстремальных режимов для элементов каскада.

При выполнении исследований необходимо:

– ввести по запросу программы в ЭВМ информацию о первичных параметрах исследуемого каскада (параметрах элементов и источника питания) согласно выполняемому варианту;

– найти последовательно для каждого элемента экстремальный режим и соответствующее этому режиму значение величины $K_{H \max i}$;

– сравнить полученные значения величин $K_{H \max i}$ со значениями $K_{H \text{ пред } i}$, указанными в табл. 5.1;

– сделать выводы о правильности использования элементов по коэффициентам их нагрузки;

– дать при необходимости рекомендации по замене элементов.

Информация, необходимая для исследования элементов каскада, вводится в ЭВМ по запросу при выполнении программы и может многократно корректироваться.

Поиск экстремального режима, т. е. неблагоприятного сочетания отклонений первичных параметров, выполняется последовательно для всех элементов. Для транзистора экстремальный режим определяется лишь по одному параметру режима: току коллектора I_K . Поиск экстремального режима для рассматриваемого элемента сводится к указанию (назначению) для первичных параметров предельных отклонений («+» или «-»). Этот процесс должен выполняться целенаправленно, т. е. с учётом влияния характера отклонения первичного параметра от номинала («+» или «-») на электрический режим работы рассматриваемого элемента. Если этот процесс выполнять случайным образом, то следует знать, что максимальное число сочетаний предельных отклонений первичных параметров («+» или «-»), которое может понадобиться перебирать, равно

$$N = 2^k,$$

где k – число первичных параметров, определяющих экстремальный режим работы рассматриваемого элемента.

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

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

$$K_{H \max i} \leq K_{H \text{ пред } i}, \quad (5.3)$$

где $K_{H \text{ пред } i}$ – регламентированное предельное (максимальное) значение коэффициента нагрузки i -го вида элемента (см. табл. 5.1).

Рекомендации по замене элемента даются в случае невыполнения условия (5.3). Суть рекомендаций должна сводиться к замене рассматриваемого элемента новым элементом с такой эксплуатационной электрической характеристикой, для которой условие вида (5.3) будет выполняться.

5.4. Задание на экспериментальную часть

При выполнении работы рекомендуется соблюдать следующую последовательность:

1. Запустить программу для ЭВМ с именем **lab2.exe**, используемую для расчёта режимов работы элементов каскада.

2. Уточнить у преподавателя номер исследуемого каскада.

3. Ввести по запросу программы **lab2.exe** (при её выполнении) требуемую информацию о первичных параметрах и эксплуатационных электрических характеристиках элементов согласно выполняемому варианту задания. При исследовании НЧ усилительного каскада эта информация соответствует табл. 5.2, для других каскадов указывается ЭВМ.

4. Найти последовательно для каждого из элементов исследуемого каскада значения величин $K_{H \max i}$, соответствующие экстремальным режимам их работы; необходимо найти для транзисторов и интегральных микросхем значение величины $K_{H \max i}$ только по одному параметру, указываемому ЭВМ, например, для НЧ усилительного каскада – току коллектора. Процесс нахождения величин $K_{H \max i}$ должен выполняться целенаправленно, т. е. с учётом влияния характера отклонения первичного параметра от номинала («+» или «-») на электрический режим работы рассматриваемого элемента, что требует от студента детального анализа электрической схемы.

5. Сделать выводы о правильности использования элементов по коэффициентам их нагрузки и при необходимости заменить элементы, не обеспечивающие надёжную работу усилительного каскада.

Примечания: 1. В программе для ЭВМ, используемой для выполнения экспериментальной части лабораторной работы, может быть установлен режим контроля действий студента. Если студент пытается добиться нахождения величин $K_{H \max i}$ методом случайного перебора отклонений параметров от номинала («+» или «-»), то за каждую неверную попытку ему начисляются штрафные баллы, причём в геометрической прогрессии. Большое число штрафных баллов свидетельствует о том, что методика выполнения работы и анализ схемы каскада не были осмыслены на должном уровне, а экспериментальная часть лабораторной работы выполнялась на «чисто механическом» уровне.

2. Экспериментальная часть работы предусматривает последовательное выполнение всех вариантов заданий исследуемого каскада.

3. По усмотрению преподавателя для исследований может быть предложено несколько каскадов (в том числе схем, содержащих операционные усилители) с уменьшением (при необходимости) числа вариантов в пределах каждого каскада. В этом случае рекомендуется использовать программное средство Electronic Workbench (Multisim).

5.5. Содержание отчёта

1. Формулировка цели работы.
2. Схема исследуемого устройства.
3. Исходные данные для выполнения экспериментальной части работы согласно варианту задания.
4. Значения величин $K_{H \max i}$, полученные при анализе устройства на ЭВМ; эти величины рекомендуется указать совместно с другой информацией в табл. 5.3.
5. Выводы по работе.

Таблица 5.3

Позиционное обозначение	Номинальное значение и допуск параметра	Характеристика $F_{\text{ном}}$ (по ТУ)	$K_{H \text{ ном}}$	$K_{H \text{ max}}$	$K_{H \text{ пред}}$
R1	18к ± 10 %	0,125 Вт	0,13	0,21	0,5
...

5.6. Контрольные вопросы

1. Что понимают под коэффициентом электрической нагрузки элементов?
2. Какую характеристику элемента используют при расчёте коэффициента нагрузки?

3. Какие рекомендуемые (в общем случае) значения коэффициентов электрической нагрузки типовых элементов РЭС вы знаете?

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

8. 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?

ЛИТЕРАТУРА

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

2. Улинич, Р. Б. Практическое обеспечение надёжности РЭА при проектировании / Р. Б. Улинич. – М. : Радио и связь, 1985. – 85 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 РЭС; 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 РЭС методами распознавания образов: общие сведения

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

В процессе сборки ответственных устройств РЭС возникают задачи отбора элементов повышенного уровня надёжности (качества). Для решения этих задач пригодны основанные на теории распознавания образов методы индивидуального прогнозирования, базирующиеся на использовании вероятностных (стохастических) связей между значениями электрофизических параметров элементов и уровнем их качества (надёжностью). Электрофизические параметры, «несущие» информацию о качестве изделий, называют информативными параметрами или, кратко, признаками. Поэтому индивидуальное прогнозирование на основе распознавания образов называют также прогнозированием по признакам.

Для элементов и РЭС 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 $x_1^{(j)}, \dots, x_k^{(j)}$ образует образ этого экземпляра. Задача индивидуального прогнозирования состоит в том, чтобы правильно распознать этот образ.

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

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

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, принимают по значениям его признаков, измеренных в момент времени $t = 0$. Для принятия решения используется так называемое прогнозирующее правило, которое получают заранее с помощью предварительных исследований интересующего типа элементов или РЭС.

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 трех этапов – построение прогнозирующего правила. Четвёртый этап – само прогнозирование.

Обучающий эксперимент состоит в испытании на надёжность в течение времени $t_{пр}$ 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 $t_{пр}$ может быть большим (тысячи и даже десятки тысяч часов), то обычно проводят ускоренные испытания в течение времени $t_y \ll t_{пр}$, но эквивалентном с точки зрения возникновения отказов времени $t_{пр}$. По истечении времени испытаний фиксируется класс экземпляра. Результатом обучающего эксперимента является табл. 6.1.

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

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

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

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

P_0 – порог (критерий) разделения классов;

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

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

Номер экземпляра обучающей выборки	Значения признаков при $t = 0$			Класс экземпляра на момент времени $t_{пр}$
	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 бóльшие значения решающей функции F (рис. 6.1).

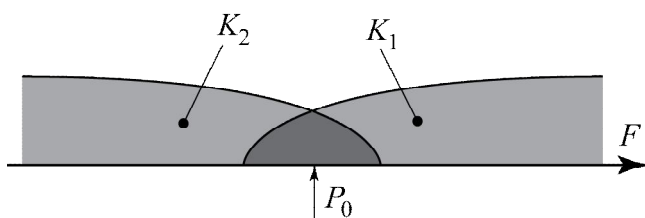


Рис. 6.1. К вопросу о соответствии значений функции F уровню надёжности точки зрения определённого критерия и оценка значений ошибок, которые могут возникнуть при прогнозировании с помощью построенного прогнозирующего правила.

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 – замена – выбор порога P_0 (лучшего с точки зрения определённого критерия) и оценка значений ошибок, которые могут возникнуть при прогнозировании с помощью построенного 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:

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

$P(K_2/\text{реш } K_1)$ – вероятность того, что экземпляр принадлежит к классу K_2 при условии, что принято решение отнести его по прогнозу к классу K_1 (риск 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 экземпляров обучающей выборки 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 к классу K_S ($s = 1, 2$).

Для количественной оценки достоверности прогнозирования (эффективности) 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 эффективности прогнозирования обеспечиваются, то прогнозирование однотипных изделий, не участвовавших 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.

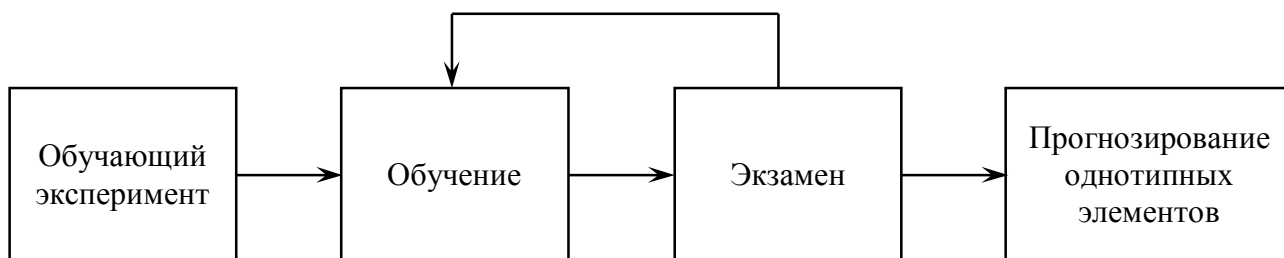


Рис. 6.2. Логическая схема процедуры прогнозирования

Обратная связь, обозначенная на схеме, указывает на возможное снижение ошибок прогнозирования, если они велики.

6.2.2. Прогнозирование методом пороговой логики

Хорошо разработанные и широко используемые в 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, 2].

Суть метода пороговой логики (далее кратко – 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 (нуль или единицу) может выполняться по соотношениям [1, 2]:

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

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

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 задается соотношением [1, 2]

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

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.

Вес $\alpha(z_i)$ i -го двоичного сигнала z_i характеризует ценность z_i для процедуры прогнозирования и определяется соотношением [1, 2]

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

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]:

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

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

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:

– определение пороговых значений, необходимых для преобразования признаков в двоичные сигналы;

– преобразование признаков каждого экземпляров обучающей выборки в двоичные сигналы;

- определение весов двоичных сигналов (единицы и нуля);
- подсчёт значения решающей функции для каждого экземпляра обучающей выборки;
- построение решающего правила и определение значения порога разделения классов;
- представление решающего правила логической таблицей, используемой для выполнения прогнозирования;
- прогнозирование однотипных изделий, не участвовавших в обучающем эксперименте.

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, однако может обеспечить приемлемые для практики результаты в случаях, когда в обучающей выборке количество экземпляров каждого класса достаточно велико ($n_U, n_V \geq 50 \dots 100$).

Если в обучающей выборке количество экземпляров для одного из классов относительно невелико, то за счёт вероятностного разброса параметров признаков может возникнуть ситуация «вложенности» классов (рис. 6.4). Подобная ситуация может случиться и при больших значениях n_U и n_V .

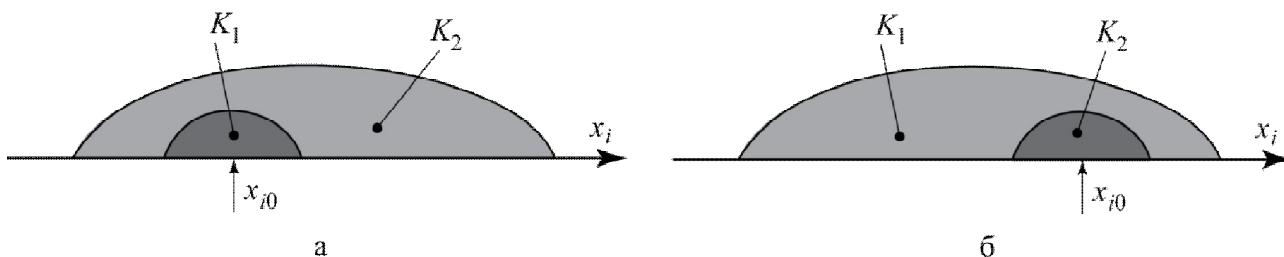


Рис. 6.4. Группирование значений признака x_i на его числовой оси в случае эффекта «вложенности» классов K_1 и K_2

а – класс K_1 вложен в класс K_2 ; б – класс K_2 вложен в класс K_1 ;
 x_{i0} – пороговый уровень признака x_i

В таких случаях выбор x_{i0} по выражениям, аналогичным (6.14), далёк от оптимального (см. рис. 6.4). Здесь необходимо использовать другие способы.

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

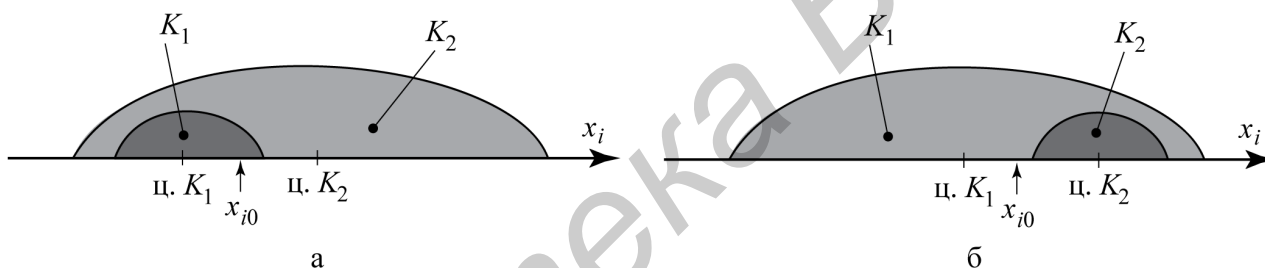


Рис. 6.5. Возможное расположение центров классов (средних значений x_i в классах) на числовой оси признака x_i в случае эффекта «вложенности» классов

а – класс K_1 вложен в класс K_2 ; б – 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

Рабочая формула для определения x_{i0} в этом случае принимает вид

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

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

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

Величина x_{i0} может также выбираться из условия [4]

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

где $P_{\text{прав}}(x_{i0})$ – вероятность принятия правильных решений, соответствующая выбираемому пороговому уровню x_{i0} .

С учётом выражений (6.8) или (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 выражениям (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 выражениям (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 ($i = 1, 2, \dots, k$).

Способы, в которых используются формулы (6.14) и (6.15), в общем случае не являются оптимальными ни с точки зрения минимума среднего риска [3], ни с точки зрения вероятности принятия правильных решений [1, 3, 4]. 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} не является лучшим.

В работе [5] предложен способ, согласно которому оптимальным считается такое значение x_{i0} , при котором двоичный сигнал (ноль или единица), полученный по результатам преобразования признака любого наугад взятого экземпляра, обеспечивает получение максимального количества информации о классе этого экземпляра. Для определения x_{i0} предлагается использовать информационный подход (положения теории информации).

Возможность применения информационного подхода к определению пороговых уровней признаков обосновывается следующим [5]. Контроль (измерение) признака $x_i^{(j)}$ j -го экземпляра и его преобразование по выражениям 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 , ибо 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 определенное количество информации $I(x_{i0})$. В качестве критерия выбора x_{i0} можно 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 неопределенности) 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 [6], получены следующие формулы для подсчёта величин $H(K_S)$ и $H(K_S/x_{i0})$ [5]:

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

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

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

$P(K_S/z_i = \xi)$ – 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 выражениям (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 ; $\xi = 0$ или $\xi = 1$;

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

С учётом того, что в МПЛ z_i может принимать лишь два значения (нуль или единицу), рабочие формулы для подсчёта интересующих вероятностей примут вид [5]:

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

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).

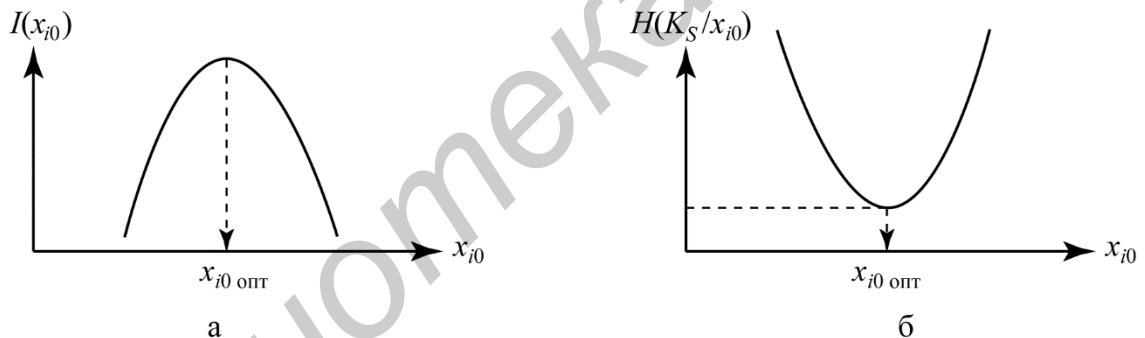


Рис. 6.6. Теоретические (гипотетические) зависимости информационных характеристик от порогового уровня x_{i0}

а – для количества информации;

б – для условной энтропии; $x_{i0\text{опт}}$ – 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 $P(K_1/z_1=1)$ и $P(K_1/z_1=0)$. Эти оценки в соответствии с выражением (6.11) принимаются в качестве веса $\alpha(z_i)$.

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

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

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

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

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.

Номер набора (комбинации)	Двоичные сигналы			Значения решающей функции $\Sigma a(z_i)$	Класс изделия по прогнозу
	z_1	...	z_k		
1	$z_1^{(1)}$	...	$z_k^{(1)}$	$F^{(1)}$	$K_s^{(1)}$
2	$z_1^{(2)}$	...	$z_k^{(2)}$	$F^{(2)}$	$K_s^{(2)}$
...

Рис. 6.7. Общий вид логической таблицы

7. Прогнозирование новых однотипных изделий, не участвовавших 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 выражениям (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.

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

Информативный параметр	Обозначение	Режим измерения
Коэффициент передачи тока базы в схеме с общим эмиттером	$h_{21Э}$	$I_Э = 600$ мА (ток эмиттера) $U_{КЭ} = 10$ В (напряжение коллектора – эмиттер)
Напряжение насыщения коллектор – эмиттер	$U_{КЭ\text{ нас}}$	$I_Э = 600$ мА $I_Б = 100$ мА (ток базы)
Ток запёртого транзистора	$I_{КЭХ}$	$U_{КЭ} = 10$ В, $U_{БЭ} = -5$ В (напряжение база – эмиттер)
Ёмкость коллекторного перехода	$C_К$	$U_{КБ} = 0$ (напряжение коллектор-база)

Время прогнозирования $t_{пр}$, на момент которого интересуются надёжностью транзистора, составляет обычно 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 ре-

зультаты обучающего эксперимента для заданного момента времени $t_{\text{пр}}$ получают на ЭВМ с помощью математического моделирования информативных параметров и уровня надёжности транзисторов [7]. В качестве уровня надёжности транзисторов указывается класс экземпляра к моменту времени $t_{\text{пр}}$: K_1 – для не отказавших (надёжных) и K_2 – для отказавших (дефектных, ненадёжных) экземпляров.

При получении на ЭВМ результатов обучающего эксперимента информативные параметры обозначены как x_i ($i = 1, 2, \dots$). Связь между обозначениями информативных параметров в табл. 6.2 и обучающем эксперименте такова: $h_{21Э} \rightarrow x_1$, $U_{\text{КЭнас}} \rightarrow x_2$, $I_{\text{КЭХ}} \rightarrow x_3$, $C_{\text{К}} \rightarrow x_4$.

При моделировании по указанию преподавателя могут использоваться три или четыре информативных параметра. Для удобства анализа результатов обучающего эксперимента экземпляры сгруппированы по классам. Вначале представлены экземпляры класса K_1 , а затем экземпляры класса K_2 . Соотношение между количеством экземпляров классов K_1 и K_2 зависит от заданного времени $t_{\text{пр}}$.

Чем больше значение объёма обучающей выборки (n), тем выше достоверность прогнозирования. Верхнее значение числа n ограничивается обычно экономическими соображениями. На практике для элементов РЭС значение n выбирают из диапазона не менее 30...100. В лабораторной работе следует выбрать $n = 100$, если нет других указаний от преподавателя.

Располагая результатом обучающего эксперимента, студент должен методом пороговой логики (см. подразд. 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. Причем под словом «новые экземпляры» понимаются экземпляры, не участвовавшие 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: они отработали время $t_{\text{пр}}$, и их рабочий ресурс может находиться на исходе.

Последовательность применения метода пороговой логики приведена в подразд. 6.2.2. Покажем на примере, как определить пороговые значения x_{i0} , необходимые для преобразования признаков в двоичные сигналы z_i , и как подсчитывать веса двоичных сигналов z_i .

Пример 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 $t = t_{\text{пр}}$ представлены в табл. 6.3 (столбцы 1–3).

Таблица 6.3

Номер экземпляра	Значение x_i при $t = 0$	Класс 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

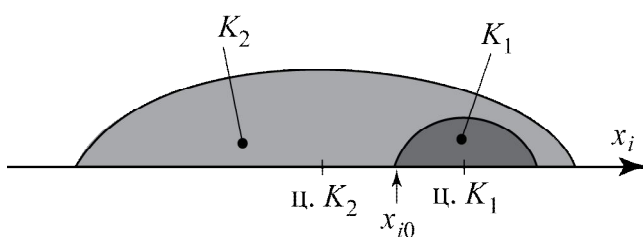


Рис. 6.8. Эффект «вложенности» классов

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,

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

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 2. Для условий примера 1 определить вес двоичного сигнала x_i при пороговом значении, равном $x_{i0} = 11$.

Решение. 1. Используя формулу (6.12), подсчитаем оценку вероятности принадлежности экземпляра обучающей выборки, к классу K_1 при условии, что двоичный сигнал z_i принял значение $z_i = 1$.

С помощью табл. 6.3 (последний столбец) подсчитываем

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).

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

$$n(K_1 / z_i = 1) = 4, \quad n(z_i = 1) = 5.$$

Тогда оценка искомой вероятности может быть определена как

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

2. С помощью формулы (6.13) определим оценку вероятности вида $P(K_1 / z_i = 0)$.

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

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, указанным в подразд. 6.2.1. Оптимальное значение величины P_0 может определяться с учётом критерия (6.5) либо критерия (6.6).

Пример 3. (Иллюстрация подсчёта характеристик n_{21} , n_{12} , $P_{\text{прав}}$, p_{21} , p_{12}). В табл. 6.4 приведены значения решающей функции F , подсчитанные для экземпляров обучающей выборки.

Таблица 6.4

Номер экземпляра	Действительный класс при $t = t_{\text{пр}}$	Значение функции F	Класс 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 вида (6.10) значение порога $P_0 = 2,3$, определяем класс экземпляров по прогнозу (см. последний столбец табл. 6.4).

2. Сравнивая действительный класс экземпляра (второй столбец табл. 6.4) с классом экземпляра по прогнозу (последний столбец табл. 6.4), определяем характеристики $n_{12} = n(K_1/\text{реш } K_2)$, $n_{21} = n(K_2/\text{реш } K_1)$, $n(\text{реш } K_1)$, $n(\text{реш } K_2)$. Не трудно 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 $n = 8$.

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

$$P_{12} = \frac{n_{12}}{n(\text{реш } K_2)} = \frac{2}{5} = 0,4; \quad P_{21} = \frac{n_{21}}{n(\text{реш } K_1)} = \frac{1}{3} \approx 0,33.$$

Программа для ЭВМ, используемая в лабораторной работе, написана таким образом, что все последующие действия студенту подсказываются. Программа имеет режим, предусматривающий контроль знаний и навыков студента. В этом случае отдельные характеристики и величины предлагаются студенту определить путём обычного «ручного» расчёта. Если характеристика или величина рассчитана верно, 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 экземпляров которой на момент времени $t_{\text{пр}}$ будет указана после выполнения студентом прогнозирования.

6.4. Задание на экспериментальную часть

При выполнении работы рекомендуется соблюдать следующую последовательность:

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;
 - объём обучающей выборки;
 - время, для которого интересуются надёжностью транзисторов.

2. Запустить программу для ЭВМ с именем *lab3.exe*. В некоторых редакциях программы её выполнение начинается после ввода кода, вводимого преподавателем.

3. Для признака, который будет указан ЭВМ, «ручными» приёмами определить значение порогового уровня x_{i0} и ввести его в ЭВМ по запросу программы. Способ определения x_{i0} также указывается ЭВМ. Если значение x_{i0} определено верно (допускается погрешность $\pm 5\%$), то значения пороговых уровней для остальных признаков будут подсчитаны ЭВМ автоматически.

4. Проанализировать двоичные сигналы для признака (столбца), указанного ЭВМ, и определить «ручным» расчётом вес двоичных сигналов $z_i = 1$ и $z_i = 0$ (см. пример 2). Если эти характеристики подсчитаны верно (допускается погрешность $\pm 5\%$), то аналогичные характеристики, соответствующие остальным признакам, будут подсчитаны ЭВМ автоматически.

5. Подсчитать для указанного ЭВМ экземпляра с учётом его двоичных сигналов значение решающей функции F . Если подсчёт выполнен верно (допускается погрешность $\pm 5\%$), то для остальных $(n - 1)$ экземпляров значение функции F будет подсчитано автоматически.

6. Проанализировать столбец значений решающей функции и определить границы зоны перекрытия функции F .

7. Задаться 6–10 значениями функции F , включая границы зоны перекрытия. Эти точки в дальнейшем будут использоваться для определения значения порога разделения классов P_0 . Для одной из точек, указанной ЭВМ, определить характеристики $P_{\text{прав}}$, p_{12} и p_{21} (см. пример 3). Для чего вначале, принимая во внимание значения точки (величины P_0), подсчитать характеристики n_{12} , n_{21} , $n(\text{реш } K_1)$, $n(\text{реш } K_2)$. Столбец с указанием класса экземпляра по прогнозу при значении величины P_0 будет выведен на экран монитора ЭВМ.

Если характеристики $P_{\text{прав}}$, p_{12} и p_{21} , соответствующие указанному ЭВМ значению величины P_0 , подсчитаны верно (допускается погрешность $\pm 5\%$), то для остальных точек зоны перекрытия значений F указанные характеристики будут определены автоматически.

8. Построить график зависимости $P_{\text{прав}}$ от порога P_0 и в качестве искомой величины P_0 выбрать такое значение, которое отвечает условию $P_{\text{прав}} \rightarrow \max$. После ввода в ЭВМ найденного значения P_0 будут указаны более точные значения величин P_0 и $P_{\text{прав}}$ и приведено прогнозирующее правило в виде логической таблицы, содержащей комбинации двоичных сигналов, соответствующие классу K_1 .

9. 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 число ошибочных решений. После завершения анализа экземпляров контрольной выборки она даёт оценку вероятности принятия правильных решений применительно к этой выборке.

10. Используя результаты, полученные в п. 7, 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 $p_{21} \leq p_{21\text{доп}}$. Рекомендуется $p_{21\text{доп}}$ брать не выше значения 0,1.

Для выбранного по графикам значения порога разделения классов P_0 зафиксировать значения p_{21} и p_{12} . После этого ввести в ЭВМ значение порога P_0 . На экране монитора будет представлена логическая таблица, содержащая комбинации двоичных сигналов, соответствующие классу K_1 .

Далее, используя полученную логическую таблицу (прогнозирующее правило), необходимо выполнить действия, указанные в п. 9.

Примечания: 1. Пункт 7 выполняется по указанию преподавателя. Значение величины $p_{21\text{доп}}$ согласовывается.

2. Расчет некоторых величин, выполняемых «ручными» приёмами, преподавателем может быть опущен. Для этого им вводится в ЭВМ код сложности работы.

3. При вводе в ЭВМ неверных ответов, в том числе с целью получения правильного ответа методом случайного перебора, студенту (бригаде студентов) начисляются штрафные баллы в геометрической прогрессии за каждый последующий неверный ответ. Большое число штрафных баллов (100 и более) рассматривается преподавателем как следствие слабой подготовки студента к работе и свидетельствует о том, что методика выполнения лабораторной работы и метод прогнозирования не были осмыслены, а экспериментальная часть работы выполнялась на «чисто механическом» уровне.

6.5. 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, $t_{\text{тр}}$; допустимое значение риска потребителя $p_{21\text{доп}}$.

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, полученное исходя из критерия $P_{\text{прав}} \rightarrow \max$. Необходимо также указать оценку вероятности принятия правильных решений.

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

8. Выводы по проделанной работе.

6.6. Контрольные вопросы

1. Какова суть и назначение обучающего эксперимента?

2. Что понимают под прогнозирующим правилом, как им пользоваться для индивидуального прогнозирования новых экземпляров (экземпляров, не принимавших участие в обучающем эксперименте)?

3. Какова роль решающей функции в прогнозирующем правиле, используемом для разделения выборки изделий на классы с точки зрения уровня надёжности?

3. Что понимают под вероятностью принятия правильных решений в случае индивидуального прогнозирования по информативным параметрам?

4. Как характеризовать ошибки, которые могут иметь место при индивидуальном прогнозировании с разделением экземпляров на классы с точки зрения уровня надёжности?

5. Какие ошибки прогнозирования описывают понятием «риск изготовителя», а какие – понятием «риск потребителя»?

6. В чём состоит отличие метода пороговой логики от других методов, используемых для решения задач индивидуального прогнозирования?

7. Что представляет собой логическая таблица, получаемая в методе пороговой логики?

8. К чему сводится индивидуальное прогнозирование новых экземпляров в случае использования логической таблицы?

ЛИТЕРАТУРА

1. Боровиков, С. М. Теоретические основы конструирования, технологии и надёжности: учеб. 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. Прогнозирование надёжности изделий электронной техники на основе информативных параметров / П. С. Гамлявый [и др.] // Обзоры по электронной

технике. Сер. 8 : Управление качеством, метрология, стандартизация. Вып. 1(619). – М. : ЦНИИ «Электроника», 1979. – 94 с.

4. Применение методов распознавания образов в системах управления качеством изделий электронной техники / М. А. Булкин [и др.] // Обзоры по электронной технике. Сер. 8 : Управление качеством, стандартизация. Вып. 6 (366). – М. : ЦНИИ «Электроника», 1976. – 76 с.

5. Боровиков, С. М. Информационный подход к определению пороговых уровней признаков в методе индивидуального прогнозирования / С. М. Боровиков, Д. М. Стасюк, Д. В. Зорин // Информатика – Машиностроение. – 1998. – №2(20). – С. 56–57.

6. Вентцель, Е. С. Теория вероятностей / Е. С. Вентцель. – М. : Наука, 1969. – 576 с.

7. Моделирование информативных параметров полупроводниковых приборов / С. М. Боровиков [и др.] // Изв. Белор. инженерной академии. – 2001. – №1(11)/3. – С. 228–230.

Библиотека БГУИР

ПРИЛОЖЕНИЕ

СПРАВОЧНЫЕ ТАБЛИЦЫ

Таблица П.1

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

x	Φ(x)	x	Φ(x)	x	Φ(x)	x	Φ(x)	x	Φ(x)	x	Φ(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

Таблица П.2

Числа, распределенные по нормальному закону в диапазоне -10 ... +10

4,8	3,9	-2,8	0,4	2,9	0,6	-1,7	-2,7	-1,7
2,1	0,0	-2,1	1,3	2,5	-3,0	-9,4	2,0	3,7
-7,6	0,7	0,6	-5,7	-9,4	-4,7	-2,7	2,0	-1,4
1,7	-2,0	4,2	-1,0	1,5	3,9	-1,5	-2,4	-3,3
-3,1	-1,1	2,2	-4,2	-1,3	-6,8	-2,0	2,3	4,8
1,7	3,5	1,6	-1,6	-7,4	6,6	9,3	3,0	6,6
3,0	-1,1	-0,6	3,5	3,3	4,5	-4,0	0,1	2,4
-2,4	-4,7	2,5	-8,5	-2,2	3,8	-8,3	3,8	-1,0
-7,3	-3,7	-2,2	5,9	-0,3	-1,9	-3,3	-2,3	0,1
1,7	1,1	-1,1	-2,0	2,7	4,1	1,2	2,1	-0,7
1,2	2,1	-0,7	-4,9	1,7	-1,9	-1,0	2,7	2,0
-0,9	3,0	-0,5	-2,5	6,0	3,8	-3,4	3,4	-3,7
1,5	1,8	6,3	0,3	0,2	4,2	4,7	-2,3	1,3
-4,5	-3,5	3,3	-1,9	-3,5	0,9	-3,3	-3,6	5,4
-1,8	4,1	0,7	-3,0	-1,5	-2,5	-0,4	3,8	5,7
3,6	1,5	2,2	5,8	6,4	1,0	7,0	6,1	1,1
70,4	2,3	1,4	-6,6	-2,8	-1,7	-0,9	1,8	-1,3
6,2	0,1	-1,4	1,5	1,1	-6,9	-3,7	6,3	-4,6
-6,4	-4,8	7,3	-8,0	1,8	2,1	2,0	3,6	2,6
0,0	-2,2	-2,2	2,0	2,8	-4,2	-3,4	0,7	0,6
6,8	1,7	3,0	1,6	4,4	7,7	3,8	1,3	-3,0
-6,4	6,8	-1,4	4,5	0,3	-1,9	0,2	-1,2	-3,6

Таблица П.3

Числа, распределенные по закону равной вероятности в диапазоне $-5 \dots +5$

-1,1	-3,7	-2,8	3,3	4,1	-0,6	-1,1	-1,9	-3,5
-0,7	1,1	-2,1	0,7	-1,5	1,8	2,2	-3,0	-1,5
-2,7	2,1	0,6	2,2	2,0	4,0	0,0	4,1	-0,6
-1,5	3,0	4,2	1,4	1,6	-1,9	0,2	-1,2	-3,6
-2,0	1,8	2,2	-1,4	-0,1	2,7	1,8	2,2	3,8
4,5	-3,5	1,6	2,3	-1,9	1,7	2,7	1,2	-2,3
3,8	4,1	-0,6	-2,2	3,8	-2,2	2,5	-0,9	2,1
-1,9	1,5	2,5	3,0	4,2	-0,3	-2,2	1,5	2,7
4,1	2,3	-2,2	-1,4	0,9	2,7	-1,1	-4,5	3,4
-1,9	0,1	-1,1	2,7	-2,5	1,7	-0,7	-2,2	-2,3
3,8	-4,8	-0,7	1,7	1,0	3,4	-0,5	-0,3	-3,6
4,2	-2,2	-0,5	1,5	-1,7	4,1	-0,6	2,7	3,8
0,9	1,7	-1,9	-1,3	4,2	-1,0	1,5	1,7	1,7
-2,5	-3,7	-3,0	-2,8	-1,7	-0,9	-1,9	-3,5	1,2
1,0	1,1	1,8	2,2	1,5	2,0	-3,0	-1,5	-0,9
-1,7	2,1	0,0	-2,1	-1,3	1,6	-3,0	-1,7	1,5
-1,9	-1,3	3,9	2,7	0,3	-1,9	0,2	-1,2	-4,5
3,8	-4,6	0,0	1,7	3,3	1,7	2,7	2,5	1,7
4,2	2,6	0,7	2,7	1,8	2,2	-1,4	-2,2	-1,9
0,9	0,6	-2,0	-0,3	-1,9	-0,9	2,3	-1,1	-3,0
-2,5	-3,0	-1,1	2,7	-3,0	1,5	4,1	-0,6	2,0
1,0	-3,6	3,5	1,7	2,4	-4,5	0,8	-0,5	1,6

Таблица П.4

Числа, распределенные по закону равной вероятности в диапазоне $1 \dots 10$

4	3	4	2	1	10	8	4	3	6	1	3	7	3
4	10	10	10	3	5	3	2	1	5	3	7	10	4
5	2	10	8	8	2	1	5	2	2	10	10	7	9
6	7	5	9	1	6	8	4	4	4	5	8	8	4
9	6	9	5	10	7	2	9	9	1	2	6	3	9
4	6	7	7	10	8	4	4	5	3	7	8	3	8
7	9	3	4	2	3	4	1	1	3	5	2	6	3
2	2	9	9	6	10	8	5	5	9	2	6	6	9
8	7	4	10	9	10	8	8	8	8	6	6	6	9
3	6	2	8	5	2	7	10	9	10	9	5	5	8
9	3	8	8	2	9	9	5	5	8	8	3	4	2
8	7	8	4	2	8	3	7	6	1	2	9	5	4
2	9	1	5	9	5	2	2	7	8	7	7	5	3
4	10	9	2	4	7	5	3	4	6	6	2	7	4

Учебное издание

Боровиков Сергей Максимович
Шнейдеров Евгений Николаевич
Бересневич Андрей Игоревич и др.

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ
ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ.
Лабораторный практикум**

ПОСОБИЕ

Редактор *И. В. Ничипор*
Корректор *Е. Н. Батурчик*

Компьютерная правка, оригинал-макет *В. М. Задоля*

Подписано в печать 20.09.2013. Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».
Отпечатано на ризографе. Усл. печ. л. 3,84. Уч.-изд. л. 3,4. Тираж 100 экз. Заказ 249.

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»
ЛИ №02330/0494371 от 16.03.2009. ЛП №02330/0494175 от 03.04.2009.
220013, Минск, П. Бровка, 6