

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

Кафедра радиоэлектронных средств

***ПРИМЕНЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ
В ПРОЕКТИРОВАНИИ ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ***

Методическое пособие по дисциплинам
«Основы математической теории планирования эксперимента»
и «Математические методы в проектировании технических изделий»
для студентов специальности «Техническое обеспечение безопасности»
заочной формы обучения

Под редакцией С. М. Боровикова

Минск БГУИР 2011

УДК 621.396.6-027.31:51-7(076)

ББК 32.844-02+22.1я73

П75

А в т о р ы:

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

Р е ц е н з е н т:

заведующий кафедрой «Защита информации» учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», профессор, доктор технических наук Л. М. Лыньков

Применение математических методов в проектировании электронных устройств : метод. пособие по дисц. «Основы математической теории планирования эксперимента» и «Математические методы в проектировании технических изделий» для студ. спец. «Техническое обеспечение безопасности» заоч. формы обуч. / С. М. Боровиков [и др.]; под ред. С. М. Боровикова. – Минск : БГУИР, 2011. – 48 с. : ил.
ISBN 978-985-488-687-9.

Приводятся содержание учебных дисциплин, методические указания по их изучению. Изложены теоретические сведения, методические рекомендации по выполнению контрольной и курсовой работ, к каждой из дисциплин даны контрольные вопросы и литература.

Может быть использовано при изучении учебной дисциплины «Математические методы в проектировании технических изделий» специальности «Электронные системы безопасности».

УДК 621.396.6-027.31:51-7(076)

ББК 32.844-02+22.1я73

ISBN 978-985-488-687-9

© УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», 2011

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	4
1. Учебная дисциплина «Основы математической теории планирования эксперимента»	5
1.1. Цель и задачи учебной дисциплины	5
1.2. Содержание учебной дисциплины	5
1.3. Методические указания по изучению теоретического материала	7
1.4. Контрольные вопросы	8
1.5. Общая характеристика контрольной работы	9
1.6. Задание №1. Получение математической модели по результатам однофакторного пассивного эксперимента	10
1.6.1. Теоретические сведения	10
1.6.2. Методические указания по выполнению задания	14
1.6.3. Последовательность выполнения задания	15
1.6.4. Содержание отчёта	17
1.7. Задание №2. Получение математической модели по результатам многофакторного пассивного эксперимента	18
1.7.1. Теоретические сведения	18
1.7.2. Методические указания по выполнению задания	19
1.7.3. Последовательность выполнения задания	20
1.7.4. Содержание отчёта	21
Литература	22
2. Учебная дисциплина «Математические методы в проектировании технических изделий»	23
2.1. Цель и задачи учебной дисциплины	23
2.2. Содержание учебной дисциплины	23
2.3. Методические указания по изучению теоретического материала	26
2.4. Контрольные вопросы	31
2.5. Курсовая работа по учебной дисциплине	34
2.5.1. Общие требования к курсовой работе	34
2.5.2. Рекомендации по выполнению курсовой работы	37
2.5.3. Особенность определения показателей безотказности РЭУ ...	44
2.5.4. Описание работ, выполненных с применением ЭВМ	45
Литература	47

Предисловие

В учебном плане специальности 1-38 02 03 «Техническое обеспечение безопасности» (специализация «Технические средства защиты информации») дисциплины «Основы математической теории планирования эксперимента» и «Математические методы в проектировании технических изделий» занимают особое положение. В целом совместно эти дисциплины должны обеспечить умение специалиста применять прикладные математические методы при проектировании технических средств защиты информации, в том числе средств, использующих принципы радиотехники и электроники.

Дисциплина «Основы математической теории планирования эксперимента» должна дать знания и сформировать умения по получению математических моделей технических средств или технологических процессов их изготовления методами теории планирования эксперимента. Знания и умения по описанию случайных параметров элементов и выходных параметров (характеристик) устройств с учётом их вероятностного рассеивания, а также по оценке точности выходных параметров устройств вероятностно-статистическими методами с использованием математических моделей устройств формируются при изучении дисциплины «Математические методы в проектировании технических изделий». При изучении этой дисциплины студенты получают навыки по исследованию выходных характеристик устройств методом статистического (имитационного) моделирования на ЭВМ разброса параметров элементов, входящих в устройство, или отказов этих элементов.

Предлагаемые лабораторные занятия и контрольная работа по дисциплине «Основы математической теории планирования эксперимента», курсовая работа по дисциплине «Математические методы в проектировании технических изделий» способствуют осмысливанию и усвоению студентами прикладных математических методов, которые применяют для расчётно-аналитического и экспериментального исследования конструкций, технологии и надёжности электронных технических средств защиты информации.

Для студентов специальности «Техническое обеспечение безопасности» (специализация «Технические средства защиты информации») учебным планом заочной формы обучения предусмотрены:

– по дисциплине «Основы математической теории планирования эксперимента»: лекции – 6 ч, лабораторные занятия – 4 ч, контрольная работа, форма отчётности – зачёт;

– по дисциплине «Математические методы в проектировании технических изделий»: лекции – 8 ч, лабораторные работы – 4 ч, курсовая работа, форма отчётности – экзамен.

1. УЧЕБНАЯ ДИСЦИПЛИНА «ОСНОВЫ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА»

1.1. Цель и задачи учебной дисциплины

Учебная программа по дисциплине «Основы математической теории планирования эксперимента» предусматривает изучение основ математической теории планирования факторных экспериментов, используемых в технике (радиоэлектронике, приборостроении, электромеханике) для получения математических моделей устройств.

Цель дисциплины – дать знания и сформировать навыки и умения по планированию эксперимента и проведению его опытов, используемых для получения математических моделей устройств.

В результате изучения дисциплины «Основы математической теории планирования эксперимента» обучаемый должен:

знать:

- методы получения математических моделей, используемых для описания выходных характеристик технических, в том числе электронных устройств и технологических процессов;
- основы математической теории планирования пассивных и активных факторных экспериментов;

уметь:

- применять пассивный многофакторный эксперимент для получения математической модели устройства или технологического процесса;
- применять активный многофакторный эксперимент для получения математической модели устройства или технологического процесса;

ориентироваться в выборе:

- прикладных математических пакетов, позволяющих получить регрессионные модели устройств или процессов по экспериментальным данным.

1.2. Содержание учебной дисциплины

Введение. Предмет, цель и задачи дисциплины. Место и значение экспериментальных исследований в решении инженерных задач по проектированию электронных технических средств защиты информации. Содержание учебной дисциплины. Рекомендуемая литература и учебно-методические пособия.

Раздел 1. Общая характеристика моделей

Тема 1. Понятие моделей и их виды. Характеристика моделей, используемых в конструировании и технологии электронных технических средств (математические, физические, графические). Понятие математических моделей, корреляционные поля зависимых параметров. Регрессионные модели. Линейные регрессионные модели. Уравнение множественной линейной регрессии.

Тема 2. Способы получения математических моделей. Факторные эксперименты. Использование пассивных и активных факторных экспериментов. Метод наименьших квадратов как математический аппарат построения регрессионных моделей по результатам эксперимента.

Тема 3. Математические модели в виде элементарных функций. Однофакторный эксперимент. Нахождение приближающих математических моделей в виде элементарных функций. Определение коэффициентов линейной математической модели. Принцип нахождения коэффициентов нелинейных моделей.

Раздел 2. Пассивный факторный эксперимент

Тема 4. Планирование пассивного факторного эксперимента. Функция отклика и факторы. Определение влияющих факторов методом корреляционного анализа. Выбор требуемого числа опытов пассивного эксперимента.

Тема 5. Регрессионный анализ. Обработка результатов эксперимента на ЭВМ. Оценка пригодности полученных моделей для практики. Значимость коэффициентов уравнения регрессии. Адекватность модели. Использование пошагового регрессионного анализа для получения уравнения регрессии по результатам многофакторного пассивного эксперимента.

Тема 6. Прикладные пакеты регрессионного анализа. Общая характеристика пакетов прикладных программ. Прикладные пакеты Windows Excel, Origion, Mathcad и др.

Раздел 3. Активный факторный эксперимент

Тема 7. Основы теории планирования активных многофакторных экспериментов. Принципы получения математических моделей с помощью активных факторных экспериментов. Кодированные безразмерные значения факторов. Нулевые уровни и размах варьирования факторов.

Тема 8. Полный факторный эксперимент (ПФЭ). ПФЭ типа « 2^k ». Матрица планирования и её свойства. Планирование ПФЭ. Выбор нулевых уровней и размаха варьирования факторов. Получение матрицы планирования – плана эксперимента. Выполнение опытов ПФЭ. Параллельные опыты, принцип рандомизации опытов.

Тема 9. Дробный факторный эксперимент (ДФЭ). ДФЭ типа « 2^{k-p} ». Планирование ДФЭ. Выполнение опытов ДФЭ.

Тема 10. Статистическая обработка результатов активных факторных экспериментов. Алгоритм статистической обработки результатов активных факторных экспериментов. Определение характера смешивания коэффициентов моделей, получаемых по результатам обработки ПФЭ и ДФЭ. Определяющий контраст и его использование для определения характера смешивания коэффициентов в ДФЭ.

1.3. Методические указания по изучению теоретического материала

Для изучения учебного материала первого раздела «Общая характеристика моделей» рекомендуется использовать учебник [1, с. 56–65]. При рассмотрении регрессионных моделей в случае числа факторов $k \geq 2$ необходимо обратить внимание на модели в виде полиномов, в частности на линейный полином, называемый уравнением множественной линейной регрессии. Такой полином,

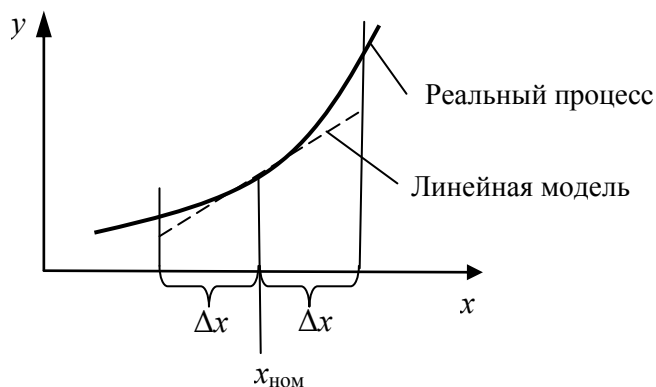


Рис. 1.1. Линейная аппроксимация выходного параметра на участке $x_{\text{ном}} \pm \Delta x$

описывающий поведение выходного параметра устройства, в большинстве случаев, как показывает практика, оказывается пригодным для дальнейшего инженерного анализа устройства. Объяснение этому факту даёт наглядное представление случай наличия одного фактора x (рис. 1.1). В радиоэлектронике, приборостроении и электромеханике величины Δx относительно малы (не более $\pm 20 \dots 50 \%$), поэтому замена резко нелинейной зависимости ха-

рактеристики y от фактора x на участке $x_{\text{ном}} \pm \Delta x$ прямой линией не приводит к большим ошибкам.

При изучении материала второго раздела «Пассивный факторный эксперимент» можно также воспользоваться учебником [1, с. 65–68] или работами [2, 3].

При применении пассивного факторного эксперимента важен вопрос выбора числа опытов. Следует знать, что для числа опытов n желательно обеспечить условие $n \geq (3 \dots 6)k$, где k — число факторов. При $k \geq 6$ качество получаемой модели оказывается достаточно хорошим. В то же время во всех случаях при получении уравнения множественной линейной регрессии должно выполняться условие $n \geq (k + 2)$.

При проработке материала третьего раздела «Активный факторный эксперимент» важно осмыслить понятие кодированных безразмерных уровней факторов. Эти уровни \hat{x}_j для фактора x_j определяют по формуле

$$\hat{x}_j = \frac{x_j - x_{j0}}{\lambda_j}, \quad (1.1)$$

где j — номер фактора ($j=1, \dots, k$);

x_j — текущее значение j -го фактора в его размерности;

x_{j0} — значение нулевого уровня j -го фактора в его размерности;

λ_j — половина размаха варьирования j -го фактора в его размерности (в специальной литературе называется также «интервалом варьирования»).

Программа учебной дисциплины предполагает рассмотрение экспериментов, в которых кодированные безразмерные значения факторов \hat{x}_j уста-

навливают на двух уровнях $+1$ и -1 , как показано на рис. 1.2, где в качестве фактора x_j рассматривается сопротивление резистора $R = 1 \text{ кОм} \pm 10 \%$. Кодированное значение фактора подчёркивается знаком $\hat{\quad}$ (дуга) над обозначением параметра R . Уровень фактора R , соответствующий большему значению R_B , называют верхним уровнем варьирования, а соответствующий меньшему значению R_H – нижним уровнем варьирования. Посредине между ними размещен

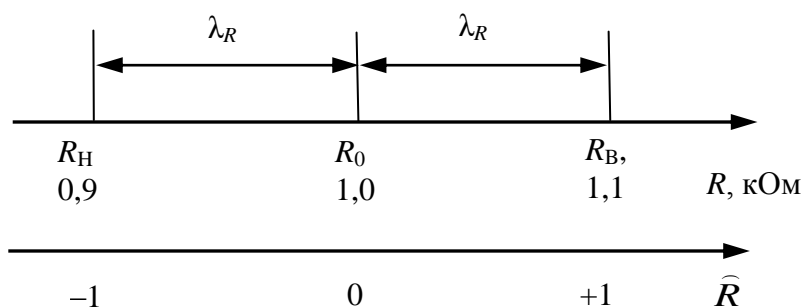


Рис. 1.2. Уровни варьирования фактором

нулевой (иначе – основной или базовый) уровень. Так как допуск на параметр R является симметричным, то в качестве нулевого уровня R_0 принято номинальное значение $R_{\text{НОМ}}$, совпадающее со средним значением R . В качестве половины размаха варьирования λ_R в данном

примере логично взять значение половины поля допуска 10 % в размерности R .

Материал третьего раздела в систематизированной форме изложен в учебнике [1, с. 68– 86]. В качестве дополнительной литературы рекомендуется использовать [2, 4].

1.4. Контрольные вопросы

Контрольные вопросы к разделу 1

1. Что понимают под графическими (геометрическими), физическими и математическими моделями? Привести примеры указанных моделей из техники.
2. Что понимают под регрессионными моделями?
3. Запишите математический вид уравнения множественной линейной регрессии и поясните величины (параметры), входящие в уравнение.
4. Какие эксперименты называют факторными (привести примеры факторных экспериментов из техники)?
5. В чём состоит отличие активных факторных экспериментов от пассивных факторных экспериментов?
6. Запишите критерий, задающий получение коэффициентов математических моделей методом наименьших квадратов.
7. Что используют в качестве математических моделей, получаемых по результатам однофакторного пассивного эксперимента (осмысливается при выполнении задания №1 контрольной работы)?

Контрольные вопросы к разделу 2

1. Как методом корреляционного анализа выбрать параметры (факторы), влияющие на выходной параметр устройства?
2. Чем следует руководствоваться при выборе числа опытов пассивного факторного эксперимента?

3. Что понимают под регрессионным анализом?
4. Что означают слова «статистическая значимость» или «статистическая незначимость» коэффициента уравнения регрессии?
5. Поясните принцип проверки статистической значимости коэффициента уравнения регрессии.
6. Что означает понятие «адекватность модели» (иначе – статистическая значимость уравнения регрессии)?
7. Поясните принцип проверки адекватности уравнения регрессии.
8. В чём состоит суть пошагового регрессионного анализа, используемого для получения уравнения регрессии по результатам многофакторного эксперимента (осмысливается при выполнении задания №2 контрольной работы)?
9. Чем следует руководствоваться в пошаговом регрессионном анализе при исключении из модели факторов, влияние которых на отклик у статистически незначимо (случай незначимости сразу двух и более факторов)?

Контрольные вопросы к разделу 3

1. В чём состоит принцип получения уравнения регрессии в виде полинома с помощью планирования активных многофакторных экспериментов?
2. Что понимают под кодированными безразмерными уровнями факторов?
3. Как планировать полный факторный эксперимент (ПФЭ) и выполнять его опыты?
4. Как следует выбирать нулевые уровни и размахи варьирования факторов при планировании ПФЭ?
5. Как построить план ПФЭ в случае k факторов?
6. С какой целью проводят серии параллельных опытов?
7. В чём состоит назначение процедуры рандомизации опытов?
8. Что такое ПФЭ типа « 2^k »?
9. Что понимают под дробным факторным экспериментом (ДФЭ)?
10. Что такое ДФЭ типа « 2^{k-p} »?
11. Как планировать ДФЭ, имеющий минимальное, но достаточное число опытов матрицы планирования для получения линейного полинома?
12. Поясните алгоритм статистической обработки результатов активных факторных экспериментов (алгоритм осмысливается в лабораторной работе).
13. Что понимают под определяющим контрастом?
14. Как использовать определяющий контраст для определения характера смешивания коэффициентов в ДФЭ?

1.5. Общая характеристика контрольной работы

Контрольная работа по дисциплине «Основы математической теории планирования эксперимента» предусматривает выполнение двух заданий. В первом задании требуется получить математическую модель устройства по результатам однофакторного пассивного эксперимента. Второе задание предусматривает получение уравнения множественной линейной регрессии, используя результаты пятифакторного пассивного эксперимента.

1.6. Задание №1. Получение математической модели по результатам однофакторного пассивного эксперимента

Цель задания: сгенерировать с помощью ЭВМ результаты опытов однофакторного пассивного эксперимента и, используя их, получить математическую модель объекта.

При генерировании результатов эксперимента приняты следующие обозначения:

x – параметр, влияющий на выходную характеристику объекта (РЭУ), рассматривается в качестве фактора;

y – выходная характеристика РЭУ, рассматриваемая в качестве функции отклика, называемой кратко – откликом;

n – число пар величин x и y , является числом экспериментальных точек; при выполнении расчётной работы принимается $n = 16$, если преподавателем не указано другое значение.

Математическая модель РЭУ представляет собой математическое выражение, описывающее в среднем изменение отклика y в зависимости от значения фактора x .

1.6.1. Теоретические сведения

Получение на основе экспериментальных данных уравнения, которое в среднем описывает изменение отклика y в зависимости от значений фактора x (одного или нескольких), называют регрессионным анализом. Последовательность получения уравнения регрессии:

1. Формулировка задачи.
2. Уточнение выходного параметра y и определение параметра(ов), предположительно влияющих на y .
3. Сбор статистических данных (проведение эксперимента).
4. Выбор вида модели (уравнения регрессии).
5. Определение коэффициентов уравнения регрессии.
6. Оценка точности уравнения регрессии, включающая проверку статистической значимости уравнения регрессии в целом, т. е. оценку степени согласованности рассчитанных значений y результатам опытов эксперимента и проверку статистической значимости коэффициентов уравнения регрессии.
7. Уточнение и (или) улучшение модели, принятие решения об использовании построенной модели.

В случае наличия лишь одного фактора x полученную статистическую связь $y = \varphi(x)$ между x и y называют *простой регрессией*.

Рассмотрим случай простой регрессии.

При выборе уравнения регрессии в виде выражения $y = \varphi(x, a, b)$ лучшей согласно методу наименьших квадратов является такая функция $\varphi(x, a, b)$, для которой выполняется условие

$$S = \sum_{i=1}^n [y_i - \varphi(x_i, a, b)]^2 = \sum_{i=1}^n (\Delta y_i)^2 = \min, \quad (1.2)$$

где n – число экспериментальных точек (число пар величин x и y).

Запись $y = \varphi(x, a, b)$ подчёркивает то, что модель, описывающая изменение y в зависимости от x , включает два неизвестных коэффициента (a и b), подлежащих определению.

В выражении (1.2) величину $\varphi(x_i, a, b)$ можно рассматривать как теоретическое значение y для i -й экспериментальной точки (опыта). Применяя приёмы математического анализа функции S (выражения (1.2)) на минимум, путём решения с использованием формул Крамера системы двух уравнений с двумя неизвестными для определения коэффициентов a, b линейной модели

$$y = ax + b \quad (1.3)$$

могут быть получены формулы

$$a = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2}; \quad b = \frac{\sum_{i=1}^n x_i^2 \sum_{i=1}^n y_i - \sum_{i=1}^n x_i y_i \sum_{i=1}^n x_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2}. \quad (1.4)$$

Имея формулы (1.4), задача специалиста сводится к тому, чтобы правильно подставить в них координаты экспериментальных точек. В данном случае коэффициенты a и b линейной функции вида (1.3) будут получены сразу.

Заключение о статистической значимости линейного уравнения регрессии экспериментальным данным в случае любого числа факторов k принимают по статистике F , имеющей распределение Фишера. В компьютерных программах Microsoft Excel и других, используя наблюдаемые значения, её вычисляют как

$$F_{\text{расч}} = \frac{D_{\text{рег}}(y)}{D_{\text{ад}}(y)} = \frac{\frac{\sum_{i=1}^n [y_{i\text{расч}} - M^*(y)]^2}{k}}{\frac{\sum_{i=1}^n [y_i - y_{i\text{расч}}]^2}{n - (k + 1)}}, \quad (1.5)$$

где $D_{\text{рег}}(y)$ – объяснённая дисперсия – часть дисперсии отклика y , которая объяснена уравнением регрессии;

$D_{\text{ад}}(y)$ – остаточная дисперсия (иначе дисперсия адекватности) – часть дисперсии отклика y , которая не объяснена уравнением регрессии, её наличие является следствием действия неучтённых и случайных факторов;

y_i – экспериментальное значение отклика в i -м опыте ($i = 1, 2, \dots, n$);
 $y_{i \text{ расч}}$ – значение y , рассчитанное по построенной модели для i -го опыта;
 n – число опытов эксперимента;
 k – число факторов, используемых для получения уравнения регрессии (для простой линейной регрессии $k = 1$);
 $M^*(y)$ – оценка математического ожидания отклика (среднее значение y), подсчитанная по результатам всех n опытов:

$$M^*(y) = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n}. \quad (1.6)$$

Гипотеза о наличии линейной регрессии между параметрами (факторами) и откликом y принимается, если выполняется условие

$$F_{\text{расч}} > F_{\text{кр}(\gamma, f_1, f_2)}, \quad (1.7)$$

где $F_{\text{кр}(\gamma, f_1, f_2)}$ – критическое (табличное) значение критерия Фишера, соответствующее доверительной вероятности γ и числу степеней свободы: для числителя выражения (1.5) – $f_1 = k$, для знаменателя – $f_2 = n - k - 1$. В случае простой линейной регрессии $k = 1$ и, следовательно, $f_1 = 1$ и $f_2 = n - 2$.

Если по F -критерию адекватными являются различные формы связи между x и y , то более удачной считают ту форму связи, которой соответствует максимальное значение расчётного критерия F .

Если условие (1.7) не выполняется, то гипотеза о наличии линейной регрессии отвергается и необходимо строить нелинейную регрессию.

После того как выполнена проверка статистической значимости регрессионного уравнения в целом, рекомендуется (особенно для многомерных зависимостей) осуществить проверку на статистическую значимость полученных коэффициентов уравнения регрессии.

Можно пользоваться любым из двух равноценных способов: построением доверительного интервала или проверкой по t -критерию Стьюдента. При использовании первого способа для рассматриваемого коэффициента (обобщенно обозначим как коэффициент c) необходимо получить интервальную оценку в виде доверительного интервала I_γ , соответствующего доверительной вероятности γ (в технике обычно $\gamma = 0,95$):

$$I_\gamma = (c^* - \Delta c; c^* + \Delta c), \quad (1.8)$$

где c^* – оценка коэффициента, найденная с использованием формул (1.4);

Δc – возможная ошибка, возникающая от замены истинного значения коэффициента его оценкой c^* .

Если в построенный доверительный интервал I_γ попадает точка со значением $c = 0$, то коэффициент c^* (его точечная оценка) признаётся статистически незначимым и, следовательно, слагаемое с этим коэффициентом из математической модели должно быть исключено.

При использовании второго способа вначале определяется расчётное значение t -критерия Стьюдента:

$$t_{\text{расч}} = \frac{c^*}{\sigma(c)}, \quad (1.9)$$

где $\sigma(c)$ – среднее квадратическое отклонение коэффициента c .

Оценка c^* признаётся статистически значимой, если выполняется условие

$$|t_{\text{расч}}| > t_{\gamma \text{ кр}}, \quad (1.10)$$

где $t_{\gamma \text{ кр}}$ – критическое (табличное) значение критерия Стьюдента, соответствующее выбранной доверительной вероятности γ при числе степеней свободы f , с которым определялась $\sigma(c)$.

Для модели (1.3) значения Δa и Δb (аналог величины Δc для коэффициентов a и b) могут быть найдены по выражениям

$$\Delta a = t_{\gamma, n-2} \sigma(a) = t_{\gamma, n-2} \sqrt{\frac{n \sigma_y^2}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2}}; \quad \Delta b = t_{\gamma, n-2} \sigma(b) = t_{\gamma, n-2} \sqrt{\frac{\sigma_y^2 \sum_{i=1}^n x_i^2}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2}}, \quad (1.11)$$

где $\sigma(a)$, $\sigma(b)$ – средние квадратические ошибки (иначе – стандартные ошибки) соответственно коэффициентов a и b ;

σ_y – средняя квадратическая ошибка оценки уравнения регрессии; характеризует рассеивание экспериментальных точек относительно линии регрессии $y = ax + b$; в случае простой линейной регрессии $[\sigma_y]^2 = D_{\text{ад}}(y)$;

$t_{\gamma, n-2}$ – табличное значение критерия Стьюдента при доверительной вероятности γ и числе степеней свободы $f = n - 2$, с которым определялась величина σ_y .

Значение σ_y рассчитывается по формуле

$$\sigma_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [y_i - (ax_i + b)]^2}{n - 2}}. \quad (1.12)$$

Об удачности линейного уравнения регрессии при любом числе факторов k можно судить также по значению коэффициента детерминации R^2 :

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n [M^*(y) - y_{i\text{расч}}]^2}{\sum_{i=1}^n [M^*(y) - y_i]^2}. \quad (1.13)$$

Справедливо неравенство $0 \leq R^2 \leq 1$. Коэффициент детерминации R^2 показывает, какая доля вариации отклика y объясняется изменениями факторов x_j . Чем ближе R^2 к единице, тем лучше функция $y = \varphi(x)$ описывает поведение отклика y . Если $R^2 = 0,85$, то модель объясняет наблюдаемые изменения y на 85 %. Тем самым доля изменчивости y , определяемая выражением $(1 - R^2)$, оказывается необъяснённой (влияние на y неучтенных в модели факторов). Считают, что модель хорошо описывает y , если $R^2 \geq (0,8 \dots 0,85)$.

Проверка адекватности построенной регрессионной модели исходным данным является обязательной. Если модель неадекватно отражает данные, модель считается неправильно выбранной и её выбор должен быть пересмотрен.

Для адекватной модели обычно рассчитывается характеристика точности, например средняя относительная ошибка (в процентах):

$$\Delta = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|y_{i\text{расч}} - y_i|}{y_i} \times 100. \quad (1.14)$$

Модель считают точной, если $\Delta \leq (5 \dots 7) \%$.

1.6.2. Методические указания по выполнению задания

При апробировании нелинейных элементарных функций $y = \varphi(x, a, b)$ их вначале путём преобразований приводят к линейному виду и, пользуясь формулами (1.4), находят коэффициенты полученной линейной функции. При этом в зависимости от вида исходной функции $\varphi(x, a, b)$ в формулы (1.4) в качестве x_i и y_i должны подставляться значения координат, полученные с учётом характера сделанных преобразований. Затем с учётом выполненных ранее преобразований осуществляют переход к коэффициентам a и b исходной нелинейной модели. Покажем описанную процедуру применительно к показательной функции.

Предположим, что лучшей с точки зрения метода наименьших квадратов является функция вида

$$y = be^{ax}, \quad b > 0. \quad (1.15)$$

Прологарифмировав уравнение (1.15), получим

$$\ln y = ax + \ln b.$$

Введем обозначения $Y = \ln y$; $B = \ln b$. Тогда

$$Y = ax + B. \quad (1.16)$$

Уравнение (1.16) есть уравнение прямой линии. Её коэффициенты a и B могут быть подсчитаны по формулам (1.4), используя в качестве значений y_i значения $\ln y_i$ ($i = 1, \dots, n$). Совокупность x_i ($i = 1, \dots, n$) используется без изменения.

В результате применения формул (1.4) коэффициент a определится сразу. Для определения коэффициента b необходимо воспользоваться преобразованием

$$b = e^B. \quad (1.17)$$

С нахождением коэффициентов a и b других нелинейных элементарных функций можно ознакомиться в [1, с. 62–64].

Для выбора вида зависимости между x и y полезно построить и изучить диаграмму разброса (корреляционное поле) параметров x и y или (если это обеспечит наглядность) график, на котором изображены точки с координатами $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$.

Проверку адекватности нелинейных моделей вида $y = \varphi(x, a, b)$ можно выполнить по аналогии с проверкой адекватности модели $y = ax + b$, принимая во внимание линейную модель, полученную после выравнивания нелинейной функции $y = \varphi(x, a, b)$ прямой линией.

В случае статистической незначимости одного из коэффициентов линейной или нелинейной моделей вида $y = \varphi(x, a, b)$ соответствующий коэффициент из модели удаляется, уточняется модель и выполняется проверка адекватности новой модели. Если статистически незначимыми окажутся оба коэффициента, а для некоторых функций – один из коэффициентов, то модель считается некорректной. В этом случае следует выбрать другой вид модели.

1.6.3. Последовательность выполнения задания

1. С помощью программы **KR.exe** в папке **ОМТПЭ** сгенерировать результаты однофакторного эксперимента – таблицу со значениями x и y .

2. На прямоугольную координатную сетку нанести точки с координатами $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$ и по виду диаграммы разброса (корреляционного поля) параметров x и y определиться с выбором трёх элементарных функций, с помощью которых можно описать зависимость между y и x . В число этих функций обязательно включить функцию вида $y = ax + b$ (линейную модель).

3. Используя инструмент анализа **Регрессия**, включённый в настройку **Анализ данных** программы **Microsoft Excel**, для линейной функции получить коэффициенты a и b . Свободный член линейного уравнения в итогах, выдаваемых программой **Microsoft Excel**, назван Y -пересечение.

4. С помощью F -статистики Фишера выяснить соответствие линейной модели экспериментальным данным (принять $\gamma = 0,95$).

Программа **Microsoft Excel** выводит не только расчётное значение F , но и информацию о значимости уравнения регрессии в целом в предположении, что

в него включены все коэффициенты. Число в соответствующей ячейке указывает максимальный уровень значимости (вероятность вида $\alpha = 1 - \gamma$), при котором по значению рассчитанной статистики F модель должна быть признана статистически значимой (адекватной) результатам эксперимента.

Уровень значимости α – это вероятность отвергнуть верную гипотезу (гипотезу о статистической значимости уравнения регрессии).

5. Выполнить проверку статистической значимости коэффициентов a и b линейной модели и с учётом этого при необходимости уточнить модель. Программа **Microsoft Excel** выводит расчётное значение t -критерия Стьюдента, а также нижнюю и верхнюю доверительную границы для каждого из коэффициентов. По умолчанию инструмент анализа **Регрессия** использует доверительную вероятность (уровень надёжности) $\gamma = 0,95$.

Решение о статистической значимости коэффициентов может быть также принято по значению уровня значимости α (в интерпретации Excel это показатель P -значение). Коэффициент признается значимым (неслучайным) при доверительной вероятности $\gamma = 0,95$, если для него P -значение не превышает числа 0,05. P -значения выводит программа **Microsoft Excel**.

6. В случае статистической значимости коэффициента a , независимо от принятого решения по коэффициенту b , по формуле (1.13) подсчитать коэффициент детерминации R^2 и дать трактовку его значения. Если статистически незначимым окажется коэффициент a , то сделать вывод о степени корректности модели и наметить дальнейшие действия по получению модели.

7. Для выбранной нелинейной функции применить метод выравнивания (см. [1, с. 62–64]), получить прямую линию и с помощью инструмента анализа **Регрессия** пакета **Анализ данных** программы **Microsoft Excel** определить вначале коэффициенты прямой линии. Затем по F -статистике Фишера выяснить статистическую значимость этой линейной модели в целом и проверить статистическую значимость коэффициентов линейной модели. После чего с учётом преобразований, сделанных при выполнении выравнивания, найти коэффициенты a и b искомой нелинейной функции и сделать заключение о пригодности построенной нелинейной модели.

8. Повторить п. 7 для другой нелинейной модели, из числа выбранных при выполнении п. 2.

9. Для всех апробированных моделей рассчитать характеристику точности: среднюю относительную ошибку (в процентах) по формуле (1.14).

10. Написать отчёт по работе.

Примечания: 1. Табличное значение критерия Стьюдента, соответствующее доверительной вероятности $\gamma = 0,95$ при числе степеней свободы $f = n - 2 = 16 - 2 = 14$, составляет $t_{\gamma, n-2} = 2,145$.

2. Табличное значение критерия Фишера, соответствующее доверительной вероятности $\gamma = 0,95$ и числу степеней свободы $f_1 = 1$ и $f_2 = n - 2 = 14$, равно $F_{кр(\gamma, 1, n-2)} = 4,600$.

1.6.4. Содержание отчёта

1. Формулировка цели задания.
2. Результаты однофакторного эксперимента, сгенерированного на ЭВМ с указанием варианта (3 первых столбца табл. 1.1).
3. Диаграмма разброса (корреляционное поле) параметров x и y .

Таблица 1.1

Номер опыта	Значение x_i	Экспериментальное значение y_i	Значение $y_{i\text{расч}}$, рассчитанное по модели			Разность Δy_i , полученная для модели		
			1	2	3	1	2	3
1								
2								
...								
n								

4. Информация об апробированных функциях, используемых в качестве математических моделей РЭУ. Эта информация должна обязательно включать запись математического вида моделей, значения коэффициентов моделей и указание об их статистической значимости. Представить в виде табл. 1.2.

Таблица 1.2

Модель	Коэффициент a		Коэффициент b		$S = \sum_{i=1}^n (\Delta y_i)^2$	Критерий Фишера		Решение о пригодности модели	Относительная ошибка Δ , %
	Значение	$ t_{\text{расч}} $	Значение	$ t_{\text{расч}} $		$F_{\text{расч}}$	$F_{\text{кр}}$		
1 ...									
2 ...									
3 ...									

5. Значения $y_{i\text{расч}}$, подсчитанные для i -го опыта по апробированным математическим моделям 1, 2 и 3 (значения $y_{i\text{расч}}$ внести в соответствующие столбцы табл. 1.1).

6. Значения $\Delta y_i = y_i - y_{i\text{расч}}$, полученные для i -го опыта для апробированных математических моделей 1, 2 и 3 (значения Δy_i внести в соответствующие столбцы табл. 1.1).

7. Рассчитанное значение коэффициента детерминации R^2 для линейной модели.

8. Значение относительной ошибки, подсчитанной по формуле (1.14) для каждой модели (внести в табл. 1.2).

9. Выводы. Привести аргументированное заключение о модели, используемой на практике, или конкретные рекомендации по выбору модели в случае неадекватности апробированных функций с указанием дальнейших действий по получению новой модели.

Примечание. В первом столбце табл. 1.2 могут быть проставлены номера соответствующих моделей, а сами модели записаны на свободном поле ниже табл. 1.2.

1.7. Задание №2. Получение математической модели по результатам многофакторного пассивного эксперимента

Цель задания: сгенерировать на ЭВМ результаты опытов многофакторного эксперимента и получить математическую модель РЭУ с помощью прикладных программ для ЭВМ.

1.7.1. Теоретические сведения

В инженерной практике при числе факторов $k \geq 2$ популярны регрессионные модели в виде полиномов. Особый интерес представляет полином первой степени, называемый линейным полиномом. Его математический вид

$$y = a_0 + a_1x_1 + \dots + a_kx_k = a_0 + \sum_{i=1}^k a_ix_i, \quad (1.18)$$

где y – выходной параметр РЭУ, рассматривается как функция отклика;

x_1, \dots, x_k – первичные параметры (параметры элементов и окружающей среды, питающие напряжения т. д.), рассматриваются в качестве факторов;

k – число факторов, принятых во внимание;

a_0, a_1, \dots, a_k – коэффициенты модели, определяемые из эксперимента.

Модель вида (1.18) называют также уравнением множественной линейной регрессии.

При получении уравнения множественной линейной регрессии предпосылки регрессионного анализа и его проведения полностью совпадают с простой линейной регрессией. Особенностью множественной регрессии является наличие возможной сильной корреляции между факторами, её называют мультиколлинеарностью [6]. Явление мультиколлинеарности считают установленным, если модуль коэффициента парной корреляции между какими-то двумя факторами больше 0,8. В этом случае из двух коррелированных факторов в регрессионный анализ следует включить один из них.

Для инженерных приложений заслуживает внимания пошаговый регрессионный анализ, предполагающий исключение из модели (1.18) факторов (слагаемых), влияние которых на отклик y статистически незначимо. Исключение из модели факторов основано на проверке статистической значимости соответствующих коэффициентов a_i по t -критерию Стьюдента. Если незначимыми оказываются сразу два или несколько коэффициентов регрессии, то из модели удаляется тот фактор, которому соответствует минимальное значение t . Затем получают коэффициенты нового уравнения регрессии. Процедура проверки значимости и построения нового уравнения повторяется до тех пор, пока все коэффициенты регрессии не окажутся значимыми.

В настоящее время результаты многофакторных пассивных экспериментов, как правило, обрабатывают на ЭВМ с помощью библиотечных программ (пакетов прикладных программ).

1.7.2. Методические указания по выполнению задания

Исходными данными являются результаты пассивного многофакторного эксперимента в виде данных, приведённых в табл. 1.3 (первые шесть столбцов).

Таблица 1.3

Номер опыта	Фактор x_j				Экспериментальное значение y	y_i расч., подсчитанное по модели, приведённой в пункте	
	x_1	x_2	...	x_5		4 (см. с. 22)	5 (см. с. 22)
1							
...							
n							

Число опытов принимается $n = 30$. Число факторов $k = 5$. Конкретные исходные данные, т. е. значения факторов x_j ($j = 1, \dots, 5$) и y , в каждом опыте студент получает с помощью учебной программы для ЭВМ (имя программы **KR.exe** в папке **ОМТПЭ**) путём ввода с клавиатуры номера группы, порядкового номера студента в списке группы и календарного года.

Коэффициенты a_0, a_1, \dots, a_k уравнения вида (1.18) получают с помощью приложения **Microsoft Excel**. Это приложение выполняет расчёт t -критерия Стьюдента, используемого для проверки значимости коэффициентов, а также F -критерия (статистики) Фишера, используемого для проверки согласованности математической модели (1.18) с экспериментальными данными. Приложение **Microsoft Excel** выполняет расчёт F -критерия Фишера в предположении, что в модели присутствуют все полученные коэффициенты линейного полинома.

Если незначимыми окажутся не более трёх коэффициентов, то рекомендуется из окончательного вида модели (полинома) слагаемые с этими коэффициентами удалить и проверить адекватность построенной модели. Проверка адекватности модели (конечного вида полинома) в этом случае может быть выполнена по критерию Фишера F , определяемому в виде отношения [3]

$$F_{\text{расч}} = \frac{D_{\text{ад}}(y)}{D(y)}, \quad (1.19)$$

где $D_{\text{ад}}(y)$ – дисперсия адекватности отклика y ; характеризует расхождение между результатами опытов и расчётными значениями y , полученными по построенной модели (конечному виду полинома);

$D(y)$ – полная (общая) дисперсия отклика; характеризует разброс экспериментальных значений y относительно среднего значения отклика.

Дисперсии $D_{\text{ад}}(y)$ и $D(y)$ подсчитывают по формулам

$$D_{\text{ад}}(y) = \frac{\sum_{i=1}^n [y_i - y_{i\text{расч}}]^2}{n - d}, \quad (1.20)$$

$$D(y) = \frac{\sum_{i=1}^n [y_i - M^*(y)]^2}{n-1}, \quad (1.21)$$

где y_i – экспериментальное значение отклика в i -м опыте;
 $y_{i \text{ расч}}$ – расчётное (по построенной модели) значение отклика в i -м опыте;
 n – число опытов эксперимента;
 d – число значимых коэффициентов в построенной модели;
 $M^*(y)$ – оценка математического ожидания отклика (среднее значение y), подсчитанная по результатам всех опытов:

$$M^*(y) = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n}. \quad (1.22)$$

Решение об адекватности модели принимают по условию

$$F_{\text{расч}} < F_{\text{кр}}, \quad (1.23)$$

где $F_{\text{кр}}$ – критическое (табличное) значение критерия Фишера, найденное для заданной доверительной вероятности γ (обычно 0,95) при числе степеней свободы для числителя f_1 и знаменателя f_2 выражения (1.19):
 $f_1 = n - d$, $f_2 = n - 1$.

В табл. 1.4 приведены значения $F_{\text{кр}}$ для доверительной вероятности $\gamma = 0,95$. Для получения $F_{\text{кр}}$, соответствующего значениям f_1 и f_2 , не приведённым в табл. 1.4, можно воспользоваться линейной интерполяцией.

Таблица 1.4

$f_2 = n-1$	$f_1 = n-d$				
	5	10	20	30	40
5	5,050	4,735	4,558	4,496	4,464
10	3,326	2,978	2,774	2,700	2,661
20	2,711	2,348	2,124	2,039	1,994
30	2,534	2,165	1,932	1,841	1,792
40	2,446	2,077	1,839	1,744	1,693

Если условие (1.23) выполняется, то построенная модель адекватна результатам эксперимента. При невыполнении условия (1.23) модель считают неадекватной, пользоваться ею на практике нельзя. Для получения модели следует продолжить пошаговый регрессионный анализ, описанный выше.

1.7.3. Последовательность выполнения задания

1. С помощью программы **KR.exe** в папке **ОМТПЭ** сгенерировать исходные данные – результаты пятифакторного эксперимента (см. табл. 1.3).

2. С помощью инструмента анализа **Корреляция** пакета **Анализ данных** программы **Microsoft Excel** определить коэффициенты парной корреляции между

факторами. Используя полученную корреляционную матрицу, уточнить, имеются ли пары параметров, образованные из факторов x_i ($i = 1, 2, \dots, 5$), для которых $|r| \geq 0,8$. При необходимости из каждой пары сильно коррелированных параметров для процедуры регрессионного анализа оставить по одному.

3. Используя результаты эксперимента, с помощью инструмента анализа **Регрессия** пакета **Анализ данных** программы *Microsoft Excel* получить точечные оценки коэффициентов a_0, a_1, \dots, a_k уравнения множественной линейной регрессии вида (1.18). При этом фактор(ы), исключённый из регрессионного анализа в п. 2, не участвует в качестве исходных данных инструмента анализа **Регрессия**.

4. Выбрав доверительную вероятность $\gamma = 0,95$, проверить статистическую значимость коэффициентов уравнения множественной линейной регрессии, полученного после выполнения первого шага регрессионного анализа. Для проверки значимости коэффициентов воспользоваться t -критерием Стьюдента или нижней и верхней доверительной границами. Сформировать уравнение регрессии, оставив в нём слагаемые только со статистически значимыми коэффициентами.

5. С помощью критерия Фишера, рассчитываемого с использованием выражений (1.19)–(1.22), выяснить пригодность построенной в п. 4 линейной модели для практики (принять $\gamma = 0,95$).

6. Независимо от результатов проверки адекватности, выполненной в п. 5, продолжить пошаговый регрессионный анализ до получения уравнения линейной регрессии, в котором все коэффициенты окажутся значимыми. С помощью F -статистики, выводимой инструментом анализа **Регрессия**, уточнить адекватность конечного вида уравнения регрессии (принять $\gamma = 0,95$).

7. Для моделей, полученных в пп. 4 и 6, рассчитать среднюю относительную ошибку Δ (в процентах) по формуле (1.14). Ошибку Δ рассчитать независимо от принятого решения об адекватности моделей.

1.7.4. Содержание отчёта

1. Формулировка цели задания.
2. Таблица, содержащая результаты пятифакторного пассивного эксперимента (см. табл. 1.3).
3. Значения коэффициентов регрессии и результаты проверки их статистической значимости, полученные при реализации процедуры пошагового регрессионного анализа. Для описания результатов регрессионного анализа, полученных на каждом шаге, следует использовать табл. 1.5.

Таблица 1.5

Коэффициент модели	Точечная оценка коэффициента	Критерий Стьюдента		Решение о статистической значимости коэффициента
		расчётное значение, $ t_{\text{расч}} $	критическое (табличное) значение, $t_{\text{кр}}$	
...

4. Математический вид уравнения регрессии, полученного после выполнения первого шага регрессионного анализа и содержащего только слагаемые со статистически значимыми коэффициентами (см. п. 4 подразд. 1.7.3). Рассчитанное по выражению (1.19) и критическое значения критерия Фишера, используемые для проверки адекватности этого уравнения.

5. Конечный вид уравнения регрессии, полученного с помощью пошагового регрессионного анализа. Расчётное (с помощью инструмента анализа **Регрессия**) и критическое значения критерия F , используемые для проверки адекватности этого уравнения регрессии.

6. Значения относительной ошибки (в процентах), подсчитанные по формуле (1.14) для уравнений регрессии, приведённых в пп. 4 и 5.

7. Значения $u_{i\text{расч}}$, подсчитанные для i -го опыта по уравнениям регрессии, указанным в пп. 4 и 5 (значения $u_{i\text{расч}}$ внести в табл. 1.3).

8. Выводы. Привести аргументированное заключение о математической модели, которой следует пользоваться на практике, или указать рекомендуемые действия инженера.

Примечания. 1. Ответы на пп. 4–6 привести в табл. 1.6.

2. В первом столбце табл. 1.6 могут быть проставлены номера соответствующих уравнений регрессии, а сами уравнения записаны на свободном поле ниже табл. 1.6.

Таблица 1.6

Уравнение регрессии (модель)	Использование критерия Фишера			$S = \sum_{i=1}^n (\Delta y_i)^2$	Средняя относительная ошибка Δ , %	Коэффициент R^2
	$F_{\text{расч}}$	$F_{\text{кр}}$	Условие адекватности			
			$F_{\text{расч}} > F_{\text{кр}}$ или $F_{\text{расч}} < F_{\text{кр}}$			

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. Яншин, А. А. Теоретические основы конструирования, технологии и надёжности ЭВА : учеб. пособие для вузов / А. А. Яншин. – М. : Радио и связь, 1983. – 312 с.

3. Зажигаев, Л. С. Методы планирования и обработки результатов физического эксперимента / Л. С. Зажигаев, А. А. Кишьян, Ю. И. Романиков. – М. : Атомиздат, 1978. – 232 с.

4. Адлер, Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Ю. В. Марков, Ю. В. Грановский. – М. : Наука, 1976. – 279 с.

5. Тюрин, Ю. Н. Анализ данных на компьютере / Ю. Н. Тюрин, А. А. Макаров ; под ред. В. Э. Фигурнова. – М. : ИНФРА-М, 2003. – 544 с.

6. Вайну, Я. Я. Корреляция рядов динамики / Я. Я. Вайну. – М. : Статистика, 1977. – 119 с.

2. УЧЕБНАЯ ДИСЦИПЛИНА «МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ПРОЕКТИРОВАНИИ ТЕХНИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ»

2.1. Цель и задачи учебной дисциплины

Цель дисциплины – дать знания и сформировать навыки и умения по применению математических методов для описания случайных параметров, оценке точности выходных параметров устройств вероятностно-статистическими методами и исследованию параметров устройств методом статистического моделирования.

В результате изучения дисциплины «Математические методы в проектировании технических изделий» обучаемый должен:

знать:

- методы вероятностного описания случайных параметров в технике;
- основные законы распределения, используемые в технике для описания производственного рассеивания параметров элементов и технологических операций, характеристик и свойств конструкций устройств, включая надёжность;
- экспериментальные методы получения вероятностного описания случайных параметров;
- методы анализа точности и стабильности параметров устройств;
- методы математического моделирования вероятностных свойств параметров;

уметь:

- получать вероятностное описание независимых и зависимых случайных параметров, используя экспериментальные методы;
- применять вероятностно-статистические методы для анализа точности и стабильности выходных параметров устройств;
- моделировать на ЭВМ производственное рассеяние параметров элементов и определять на основе этого характеристики точности выходных параметров устройств;

ориентироваться в выборе:

- математических методов, используемых для аналитического и экспериментального исследования конструкций устройств и технологических процессов их изготовления;
- прикладных математических пакетов, позволяющих получить регрессионные модели устройств или процессов по экспериментальным данным.

2.2. Содержание учебной дисциплины

Введение. Предмет, цель и задачи дисциплины. Место и значение прикладных математических методов в решении инженерных задач при проектировании электронных технических средств обеспечения безопасности. Содержание учебной дисциплины. Рекомендуемая литература и учебные пособия.

Раздел 1. Вероятностное описание параметров в радиоэлектронике и приборостроении

Тема 1. Вероятностное описание параметров, рассматриваемых в отдельности. Характеристика параметров элементов и электронных средств обеспечения безопасности. Случайный характер параметров и их вероятностное описание. Основные законы распределения, используемые для описания производственного рассеивания параметров элементов, характеристик и свойств материалов, надёжности.

Тема 2. Вероятностное описание совокупности параметров. Зависимые и независимые параметры. Способы вероятностного описания совокупности параметров. Корреляция параметров. Корреляционное поле (диаграмма разброса) параметров. Коэффициент линейной корреляции. Положительная и отрицательная корреляции. Вероятностное описание зависимых параметров. Корреляционные матрицы.

Тема 3. Математическая статистика в применении к определению вероятностного описания параметров элементов и устройств. Определение вероятностного описания параметров методами математической статистики. Выборочные характеристики параметров. Оценки числовых характеристик параметров и основные требования, предъявляемые к оценкам. Точечные и интервальные оценки основных числовых характеристик параметра. Определение требуемого числа наблюдений параметра (планирование наблюдений). Оценка коэффициентов парной корреляции и проверка их статистической значимости. Выбор закона распределения параметра по опытным данным. Гистограмма и статистическая функция распределения. Проверка статистических гипотез с помощью критериев согласия. Использование вероятностных сеток для проверки гипотез о законе распределения параметра.

Раздел 2. Вероятностно-статистические методы анализа точности и стабильности выходных параметров устройств

Тема 4. Виды допусков и их использование для описания точности и стабильности параметров. Серийнопригодность конструкций и её количественная оценка. Точность и стабильность параметров. Виды допусков в радиоэлектронике и приборостроении. Характеристики, используемые для задания допуска. Количественное описание точности и стабильности параметров элементов.

Тема 5. Анализ точности выходных параметров устройств. Уравнения производственных погрешностей выходных параметров устройств. Коэффициенты влияния параметров элементов на выходной параметр устройства. Способы определения коэффициентов. Методы аналитического анализа точности выходных параметров. Оценка производственного разброса выходного параметра, исходя из наихудшего случая рассеивания параметров элементов. Ана-

лиз точности выходных параметров с учётом вероятностного рассеивания параметров элементов.

Тема 6. Принципы анализа стабильности и установления эксплуатационных допусков на выходные параметры. Стабильность выходных параметров и принцип её оценки. Уравнение относительной погрешности выходного параметра с учётом действия эксплуатационных факторов. Принципы установления температурных допусков и допусков старения на выходные параметры устройств. Факторы, определяющие изменение параметров устройств при эксплуатации. Методика установления эксплуатационного допуска.

Раздел 3. Математические модели технических изделий

Тема 7. Характеристика математических моделей и методов их получения для устройств радиоэлектроники и приборостроения. Общие сведения о моделировании и моделях, используемых в технике (графические, физические, математические). Понятие математических моделей. Регрессионные модели. Способы получения математических моделей технических изделий. Пассивные и активные факторные эксперименты. Регрессионный анализ. Использование пакетов прикладных программ для ЭВМ при обработке экспериментальных данных.

Раздел 4. Статистическое моделирование параметров технических изделий

Тема 8. Математическое моделирование параметров элементов. Понятие статистического (имитационного) моделирования и его значение при проектировании технических изделий. Стандартные равномерные и стандартные нормальные случайные числа. Моделирование случайных чисел с нормальным распределением. Методы получения случайных чисел с любым законом распределения. Моделирование дискретных случайных чисел с распределением Пуассона. Моделирование коррелированных случайных параметров с нормальными распределениями. Получение коррелированных случайных параметров с любыми законами распределения.

Тема 9. Метод Монте-Карло как метод вероятностного моделирования технических объектов. Сущность метода. Структурная схема алгоритма реализации метода на ЭВМ. Алгоритм выбора числа реализаций смоделированного объекта. Определение интересующих характеристик объекта по результатам моделирования.

Тема 10. Статистическое моделирование выходных параметров устройств. Получение случайных значений параметров элементов с учётом их производственного рассеивания. Моделирование выходного параметра устройства с использованием его математической модели и реализаций параметров элементов. Оценка характеристик точности устройства по результатам моделирования.

2.3. Методические указания по изучению теоретического материала

В систематизированном виде учебный материал первого раздела приведён в учебнике [1, с. 7–8, с. 18–55].

Известно, что примерно в 90...95 % случаев параметры в технике распределены по законам, близким к нормальному. Поэтому изучению нормального закона надо уделить особое внимание. Для этого закона справедливо правило «трёх сигм», которым широко пользуются в технике. Согласно этому правилу в качестве предельных значений параметра принимают точки, отстоящие от среднего значения m на величину $\pm 3\sigma$, где σ – среднее квадратическое отклонение параметра, иначе – стандартное отклонение (рис. 2.1). Теоретически в диапазон $(m \pm 3\sigma)$ попадает 99,73 % значений, вероятность $P = 0,9973$. Правило «трёх сигм» позволяет определять примерное значение σ , необходимое для решения инженерных задач. Например, для параметра $R = 1 \text{ кОм} \pm 10 \%$ получим

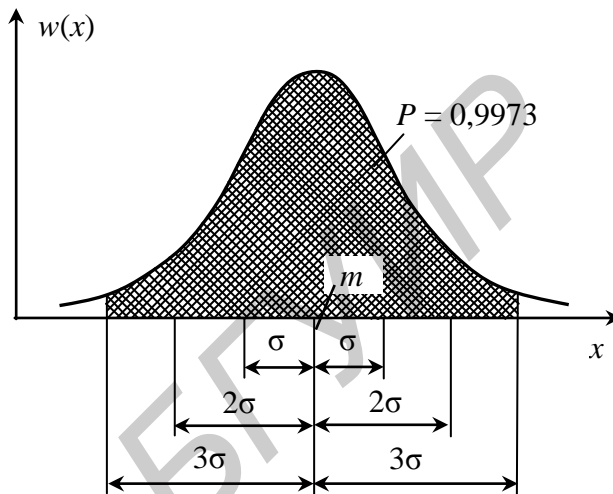


Рис. 2.1. К пояснению правила «трёх сигм»

$$\sigma(R) \approx \frac{\delta(R)}{3} = \frac{0,1}{3} \approx 0,033 \text{ кОм},$$

где $\sigma(R)$ – среднее квадратическое отклонение сопротивления резистора;

$\delta(R)$ – половина поля допуска параметра R в размерности сопротивления.

При рассмотрении зависимых параметров необходимо осмыслить понятие корреляции параметров и коэффициента корреляции как количественной характеристики, с помощью которой судят о тесноте связи между параметрами. Первое суждение о силе корреляционной связи можно получить по виду так называемого корреляционного поля параметров.

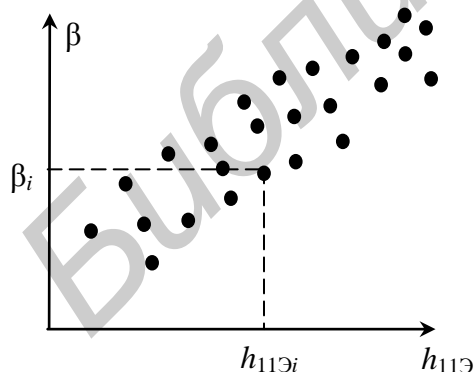


Рис. 2.2. Корреляционное поле параметров

Корреляционное поле параметров представляет собой совокупность точек, нанесённых на прямоугольную систему координат, причём каждая точка соответствует паре рассматриваемых параметров. Например, корреляционное поле параметров β и $h_{11Э}$ транзисторов может принять вид, показанный на рис. 2.2.

При изучении вопросов второго раздела необходимо в первую очередь разобраться с видами допусков, устанавливаемых на параметры, и характеристиками, используемыми для задания допусков.

На практике для задания допусков, устанавливаемых на параметры, используются следующие характеристики (рис. 2.3):

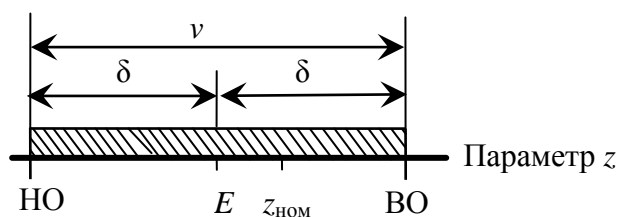


Рис. 2.3. Параметры поля допуска

1. НО и ВО – нижнее и верхнее предельные отклонения;
2. v – ширина поля допуска;
3. δ – половина поля допуска;
4. E – координата середины поля допуска.

Следует помнить, что характеристики v и δ всегда положительные. Координата E в случае несимметричного допуска не совпадает с номинальным значением параметра.

Для задания допуска на параметр используется одна или несколько из перечисленных характеристик. Указанные характеристики могут быть заданы либо значениями параметра в его размерности, либо абсолютными отклонениями параметра относительно номинального значения, либо относительными отклонениями, выраженными обычно в процентах относительно номинального значения параметра. Для перехода от одного способа задания характеристик к другому рекомендуется разобраться с табл. 2.1, в которой приводятся значения характеристик для случая ёмкости конденсаторов, для которых

$$C = 20 \text{ мкФ} \begin{matrix} +30 \% \\ -10 \% \end{matrix}$$

Значения характеристик приведены с учётом того, что номинальное значение ёмкости $C_{\text{ном}} = 20 \text{ мкФ}$.

Таблица 2.1

Характеристика, задаваемая допуск	Способ задания характеристики		
	значением параметра в его размерности C , мкФ	абсолютным отклонением параметра ΔC , мкФ	относительным отклонением параметра $\Delta C/C$, %
НО	18	-2	-10
ВО	26	+6	+30
v	8	8	40
δ	4	4	20
E	22	2	10

При проработке понятий точность и стабильность параметров следует сделать сравнительный анализ реализаций параметра, приведённых на рис. 2.4.

Точность выходного параметра устройства характеризует степень приближения его истинного значения к номинальному уровню при отклонениях параметров элементов, соответствующих производственным погрешностям.

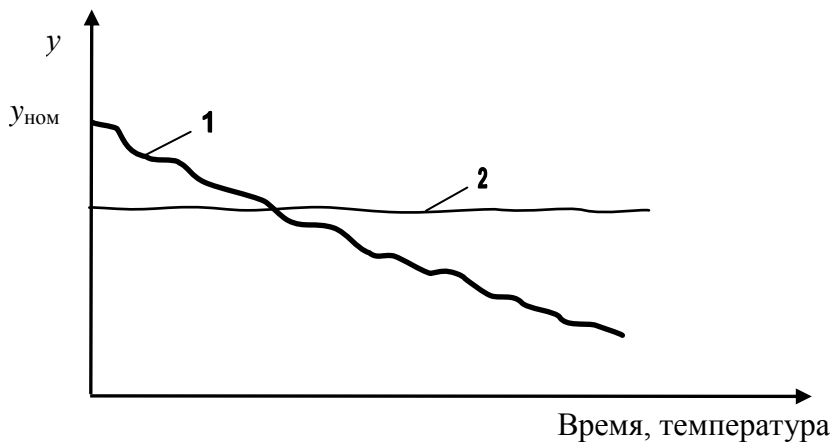


Рис. 2.4. Реализация изменения выходного параметра:
1 – параметр точен, но имеет низкую стабильность;
2 – параметр менее точен, но обладает
заметно большей стабильностью;
 $y_{ном}$ – номинальное значение параметра

Стабильность – это свойство параметра сохранять своё значение неизменным (постоянным) относительно начального значения при воздействии факторов окружающей среды и с течением времени. Обращаем внимание, что за начальное принимают значение, которое параметр имеет в момент времени $t = 0$ в нормальных (лабо-

раторных) условиях эксплуатации изделия. Когда говорят «низкая стабильность выходного параметра», то имеют в виду, что этот параметр заметно изменяется при воздействии факторов окружающей среды и процессов старения (фактор – время). Высокая точность выходного параметра вовсе не означает его высокую стабильность и, наоборот, высокая стабильность выходного параметра не есть гарантия его точности (см. рис. 2.4). Материал второго раздела изложен в учебнике [1, с. 87–114, с. 117–130]. В качестве дополнительных источников рекомендуются [2–6].

Материал третьего раздела предполагает практическое получение математических моделей с помощью пассивного и активного факторных экспериментов. Для освоения учебного материала рекомендуются источники [4, 7, 8].

Следует знать, что особенностью множественного регрессионного анализа является наличие возможной сильной корреляции между факторами, её называют мультиколлинеарностью [9]. Явление мультиколлинеарности считают установленным, если модуль коэффициента парной корреляции между какими-то двумя факторами больше 0,8. В этом случае из двух коррелированных факторов в регрессионный анализ следует включить один из них.

При изучении материала четвёртого раздела необходимо вначале разобраться с понятиями имитационное, статистическое и вероятностное моделирование параметров элементов, устройств (собираательно – объектов). Под имитационным моделированием понимают воспроизведение (имитацию) вероятностных свойств параметров объекта. Поскольку в настоящее время такое моделирование обычно выполняют на ЭВМ, то некоторые авторы практически отождествляют моделирование на ЭВМ с имитационным моделированием. В действительности имитационное моделирование параметра объекта можно выполнить и без использования ЭВМ. Многократно выполняемое имитационное моделирование позволяет получить статистические данные о выходном параметре объекта в виде ряда значений y_1, y_2, \dots, y_N , где N – число реализаций объекта.

Поэтому такое моделирование называют статистическим. Математическая обработка указанного ряда позволяет определить основные числовые характеристики параметра y : оценку математического ожидания (среднее значение) $M^*(y) = y_{cp}$ и среднее квадратическое отклонение $\sigma(y) = \sigma_y$. При необходимости может быть выбрана модель закона распределения параметра. При имитационном и статистическом моделировании воспроизводятся вероятностные свойства параметров объектов, поэтому применительно к таким видам моделирования употребляют также слова вероятностное моделирование.

При изучении методов моделирования параметров необходимо иметь в виду, что случайные значения параметров представляют собой числа, поэтому моделирование случайных параметров сводится к получению случайных чисел. Получаемые случайные числа должны иметь закон распределения и параметры (характеристики) этого закона, присущие рассматриваемому техническому параметру объекта. Случайные числа с нужными вероятностными свойствами получают с помощью формул, иначе – вычислительных алгоритмов. Эти формулы включают характеристики закона распределения рассматриваемого технического параметра и либо стандартные равномерно распределённые случайные числа r , либо стандартные нормально распределённые случайные числа z_H .

Графики плотностей распределения w для указанных случайных чисел показаны на рис. 2.5 и 2.6.

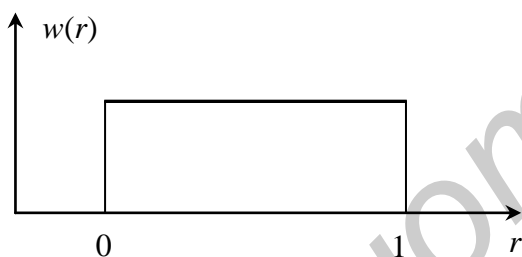


Рис. 2.5. График плотности распределения для стандартных равномерных случайных чисел r в интервале (0...1)

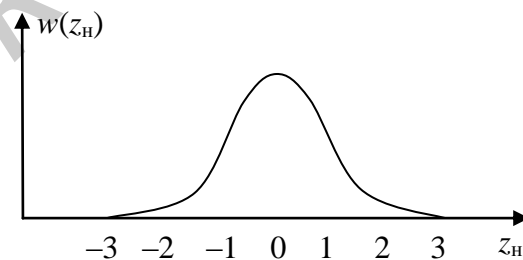


Рис. 2.6. График плотности распределения для стандартных нормальных случайных чисел z_H (параметры $m = 0, \sigma = 1$)

В табл. 2.2 приведены вычислительные алгоритмы (формулы) получения случайных чисел с законами распределения, широко используемыми при проектировании технических изделий.

Таблица 2.2

Закон распределения параметра	Математическое выражение плотности распределения	Способ получения случайных чисел	Номер формулы
1. Равномерный в интервале $[a, b]$	$w(x) = \begin{cases} \frac{1}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ 0, & x < a \text{ или } x > b \end{cases}$	$x' = (b - a)r + a$	(2.1)

Закон распределения параметра	Математическое выражение плотности распределения	Способ получения случайных чисел	Номер формулы
2. Нормальный с произвольными параметрами закона распределения m и σ	$w(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}}$	$x' = z_H \sigma + m$	(2.2)
3. Экспоненциальный с параметром закона распределения λ	$w(x) = \lambda e^{-\lambda x}, \quad x \geq 0$	$x' = -\frac{1}{\lambda} \ln(1-r)$	(2.3)
4. Логарифмически нормальный с параметрами закона распределения m и σ	$w(x) = \frac{1}{\sigma x \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln x - m)^2}{2\sigma^2}}, \quad x > 0$	$x' = e^{\sigma z_H + m}$	(2.4)
5. Вейбулла с параметрами закона распределения ρ и β ; β – коэффициент формы	$w(x) = \rho \beta x^{\beta-1} e^{-\rho x^\beta}, \quad x \geq 0$	$x' = \left[-\frac{1}{\rho} \ln(1-r)\right]^{1/\beta}$	(2.5)

В табл. 2.2 приняты следующие обозначения:

- x – текущее значение рассматриваемого технического параметра;
- x' – получаемое случайное число – дискретные отсчёты (реализации) рассматриваемого технического параметра.

Случайность значений рассматриваемого технического параметра обеспечивается присутствием в вычислительном алгоритме (формуле) стандартных случайных чисел r или z_H , диапазон нужных значений – присутствием в формуле характеристик (параметров) закона распределения этого технического параметра. Соответствие получаемых случайных значений рассматриваемого технического параметра требуемому закону распределения достигается видом функциональных преобразований, включаемых в формулу. Например, в случае экспоненциального распределения случайность получаемых значений рассматриваемого технического параметра обеспечивается присутствием в формуле (2.3) стандартного равномерного случайного числа r , диапазон возможных значений параметра x – присутствием характеристики (параметра) экспоненциального закона λ . Соответствие получаемых случайных значений технического параметра экспоненциальному закону обеспечивается видом формулы (2.3).

Из формул (2.1)–(2.5) видно, что моделирование случайных параметров выполняется с помощью характеристик (параметров) закона распределения. На практике, как правило, известны или легко могут быть получены основные числовые характеристики интересующего технического параметра x : математическое ожидание (среднее значение) $M(x) = x_{cp}$ и среднее квадратическое отклонение $\sigma(x) = \sigma_x$. Имея $M(x)$ и $\sigma(x)$, можно найти характеристики (параметры) закона распределения (табл. 2.3) и воспользоваться нужной формулой из числа (2.1)–(2.5).

Таблица 2.3

Закон распределения технического параметра	Характеристики (параметры) закона распределения, см. табл. 2.2	Формулы определения характеристик (параметров) закона распределения	Номер формул
1. Нормальный	m, σ	$m = x_{\text{ср}}, \sigma = \sigma(x)$	(2.6)
2. Равномерный	a, b	$a = x_{\text{ср}} - \sqrt{3} \sigma(x), b = x_{\text{ср}} + \sqrt{3} \sigma(x)$ или $a = x_{\text{н}}, b = x_{\text{в}}$, где $x_{\text{н}}, x_{\text{в}}$ – нижнее и верхнее значения параметра x	(2.7)
3. Экспоненциальный	λ	$\lambda = 1 / x_{\text{ср}}$	(2.8)
4. Логарифмически нормальный	m, σ	См. [12, с. 630]	(2.9)
5. Закон Вейбулла	ρ, β	См. [12, с. 630]	(2.10)

Важно осмыслить, что для получения значения выходной характеристики электронного устройства необходимо иметь его математическую модель в виде зависимости

$$y = \varphi(x_1, x_2, \dots, x_n), \quad (2.11)$$

где y – выходная характеристика электронного устройства;

x_1, x_2, \dots, x_n – параметры, влияющие на характеристику y .

В качестве выходной характеристики могут рассматриваться выходной электрический параметр, количественные показатели надёжности устройства и т. п. Значение характеристики, соответствующее конкретной реализации устройства, получают путём подстановки реализаций случайных параметров x_1, x_2, \dots, x_n в математическую модель (2.11).

Метод Монте-Карло как метод статистического моделирования на ЭВМ выходных характеристик электронных устройств с использованием математических моделей этих устройств подробно рассмотрен в [1, с. 283–284]. Применение метода Монте-Карло с указанием последовательности действий для моделирования выходных параметров устройств с учётом производственного рассеивания параметров элементов изложено в [1, с. 107–108].

В целом учебный материал четвёртого раздела в систематизированном виде приведён в учебнике [1, с. 264–294].

2.4. Контрольные вопросы

Перечень основных контрольных вопросов.

Контрольные вопросы к разделу 1

1. В чём проявляется случайность параметров в технике (радиоэлектронике, приборостроении, электромеханике)?

2. Какие количественные характеристики используют на практике для описания поведения случайных параметров?

3. Как связаны основные числовые характеристики M_x и σ_x случайного технического параметра x с характеристиками (параметрами m и σ) нормального закона распределения?

4. В чём состоит суть правила «трёх сигм» и как им пользоваться в инженерной практике?

5. Почему равномерный закон распределения параметра при прочих равных условиях является на практике худшим случаем с точки зрения рассеивания параметра?

6. В чём состоит основная особенность экспоненциального закона распределения параметров?

7. Для описания каких параметров в практике широко используют экспоненциальный закон распределения?

8. Что понимают под корреляцией параметров?

9. С помощью какой количественной характеристики в технике выполняют учёт зависимости между двумя параметрами?

10. Что такое корреляционное поле (иначе – диаграмма разброса) параметров и как по виду корреляционного поля можно определить степень взаимозависимости параметров?

11. Каково назначение корреляционной матрицы параметров?

12. С помощью каких формул определяют выборочные значения математического ожидания и среднего квадратического отклонения параметра, используя результаты его наблюдений?

13. Каково назначение гистограммы распределения параметра?

14. Почему при построении гистограммы распределения параметра рекомендуется выбирать интервалы одинаковой ширины?

15. Как можно экспериментально оценить коэффициент корреляции между параметрами?

16. Что представляют собой вероятностные сетки и каково их назначение?

Контрольные вопросы к разделу 2

1. Что означает понятие «точность параметра»?

2. В чём состоит отличие стабильности параметра от его точности?

3. Как понимать запись «высокая температурная стабильность параметра»?

4. Каково назначение производственного допуска на параметр?

5. Что понимают под технологическим допуском?

6. В чём состоит отличие симметричных допусков от несимметричных?

7. В каких случаях на параметр устанавливают односторонний допуск?

8. Поясните запись размера на чертеже детали « $\varnothing 10^{+0,5}$ ».

9. Что такое температурный допуск?

10. Какие количественные характеристики параметра используют для задания его допусков?

11. С помощью каких количественных характеристик на практике судят о точности параметра элементов?

12. С помощью каких количественных характеристик на практике судят о стабильности параметра элементов?

13. В чём состоит физический смысл температурного коэффициента (ТК) параметра элементов?

14. В чём состоит физический смысл коэффициента старения (КС) параметра элементов?

15. Чём объясняется вероятностный характер производственного разброса выходных параметров электронных, в общем случае технических устройств?

16. Какую информацию о выходном параметре устройства даёт уравнение производственных погрешностей?

17. Поясните физический смысл относительного коэффициента влияния параметра элемента. Что означает отрицательное значение этого коэффициента?

18. Поясните один из аналитических способов, используемых для определения коэффициента влияния параметра элемента.

19. На чём основан экспериментально-расчётный способ, используемый для определения коэффициента влияния параметра элемента?

20. С помощью каких количественных характеристик на практике судят о точности выходного параметра электронных устройств (технических изделий)?

21. Какие характеристики элементов надо знать, чтобы оценить производственный разброс выходного параметра электронного устройства, исходя из наихудшего случая рассеивания параметров элементов?

22. Какие характеристики элементов надо знать, чтобы оценить производственный разброс выходного параметра электронного устройства с учётом вероятностного рассеивания параметров элементов?

23. С помощью каких количественных характеристик на практике судят о стабильности выходного параметра устройств радиоэлектроники, приборостроения, электромеханики?

24. Как оценить возможные пределы изменения выходного параметра, вызываемые при эксплуатации действием температуры?

25. Как оценить возможные пределы изменения выходного параметра, вызываемые при эксплуатации действием старения (времени)?

26. Какую информацию о выходном параметре электронного устройства несёт эксплуатационный допуск?

Контрольные вопросы к разделу 3

1. Укажите виды моделей, используемые в технике.

2. Что понимают под регрессионной моделью технического устройства?

3. Что понимают под факторными экспериментами и каково их назначение?

4. В чём состоит особенность пассивных факторных экспериментов?

5. В чём состоит особенность активных факторных экспериментов?

6. Для чего служит регрессионный анализ?

7. Какой информацией надо располагать, чтобы с помощью выбранной библиотечной программы для ЭВМ (прикладного пакета) получить уравнение регрессии для выходной характеристики (параметра) электронного устройства?

Контрольные вопросы к разделу 4

1. Что понимают под статистическим (имитационным) моделированием параметров и характеристик объектов?
2. Какие случайные числа называют стандартными равномерными?
3. Что такое стандартные нормальные случайные числа?
4. Как на практике получают стандартные равномерные случайные числа (что используют)?
5. С помощью какого вычислительного алгоритма на практике обычно получают стандартные нормальные случайные числа?
6. Как получают случайные числа с любым законом распределения?
7. Как получают дискретные случайные числа с распределением Пуассона?
8. Как моделировать коррелированные случайные параметры с нормальными законами распределения?
9. С помощью какого алгоритма можно получить коррелированные случайные параметры с любыми законами распределения?
10. В чём состоит суть метода Монте-Карло как метода вероятностного моделирования выходных параметров (характеристик) технических объектов?
11. Поясните структурную схему алгоритма реализации на ЭВМ метода Монте-Карло.
12. Поясните алгоритм выбора числа реализаций смоделированного объекта.
13. Как определять результирующие характеристики объекта, используя результаты его моделирования (реализации)?
14. Как на ЭВМ получать случайные значения параметров элементов с учётом их производственного рассеивания (какие используют характеристики)?
15. Как определять значение выходного параметра устройства в конкретной реализации, используя случайные значения параметров элементов, полученные для этой реализации с учётом их (параметров) производственного рассеивания?
16. Как оценить точность выходного параметра устройства, используя результаты моделирования РЭУ с учётом производственного рассеивания параметров элементов, входящих в устройство?

2.5. Курсовая работа по учебной дисциплине

2.5.1. Общие требования к курсовой работе

Цель и тематика курсового проектирования. Целью курсового проектирования является получение практических навыков применения прикладных математических методов для решения инженерной задачи по анализу точности или стабильности выходного параметра функционального узла (ФУ) электронного устройства или же оценке показателей безотказности электронного устройства, условно содержащего до 50 однотипных каскадов. Решение задач

предлагается получить расчётно-аналитическим способом и методом статистического моделирования ФУ или устройства на ЭВМ.

Отчётными документами курсовой работы являются пояснительная записка (примерно 20...30 страниц) и графический материал.

Перечень тем курсовых работ, предлагаемых студентам.

1. Сравнительная оценка точности выходного параметра, рассчитанной аналитически вероятностным методом и полученной моделированием на ЭВМ методом Монте-Карло с учётом производственного рассеивания параметров элементов (на примере функционального узла РЭУ).

2. Сравнительная оценка температурной стабильности выходного параметра, рассчитанной аналитически и полученной на ЭВМ методом Монте-Карло с учётом вероятностного рассеивания температурных изменений параметров элементов (на примере функционального узла РЭУ).

3. Сравнительная оценка временной стабильности выходного параметра, рассчитанной аналитически и полученной методом Монте-Карло с учётом вероятностного рассеивания изменений параметров элементов, вызываемых старением (на примере функционального узла РЭУ).

4. Сравнение показателей безотказности устройства (или системы), полученных расчётно-аналитическим способом и найденных методом моделирования на ЭВМ отказов составных частей.

Задание на курсовое проектирование. Каждому студенту в период установочной сессии выдается задание на курсовое проектирование.

Студентам, которые отсутствовали на установочной сессии, задание на курсовое проектирование выдаётся в дни консультаций студентов-заочников. Задание может быть отправлено и по электронной почте. Для этого необходимо обратиться с соответствующей просьбой на электронный адрес кафедры РЭС: kafres@bsuir.by

Отчётные документы курсовой работы и основные требования, предъявляемые к ним. Отчётными документами курсовой работы являются: пояснительная записка, графический материал, распечатки программ, полученные с помощью принтера ЭВМ.

Пояснительная записка должна осветить вопросы, подлежащие проработке согласно заданию на курсовое проектирование. Чтобы придать пояснительной записке законченный вид, в неё необходимо включить задание на проектирование и вспомогательные разделы (содержание, введение, список использованных источников и т. д.).

Структура пояснительной записки:

- титульный лист (принятого в университете и на кафедре образца);
- задание на курсовое проектирование;
- содержание;
- введение;
- разделы, дающие ответ на вопросы, подлежащие проработке согласно заданию на курсовое проектирование;

- заключение;
- список использованных источников;
- приложения.

С пояснением структурных частей пояснительной записки можно ознакомиться в [10]. Здесь даётся пояснение некоторых из них.

В **заключении** необходимо сформулировать основные выводы по выполненной работе. Указать, в какой степени полученные результаты соответствуют современному уровню проектирования электронных устройств, сформулировать рекомендации по совершенствованию рассматриваемого в курсовой работе решения. Выводы должны в концентрированной форме подвести итог процессу анализа результатов, полученных в работе, с отражением основных свойств рассматриваемого решения РЭУ. Рекомендуется основные выводы формулировать в виде отдельных пунктов.

В разделе **Список использованных источников** следует перечислить только те источники, которые реально использовались студентом при выполнении курсовой работы. На эти источники должны быть ссылки в пояснительной записке.

В **приложении** необходимо поместить тексты программ для ЭВМ, в том числе с последующими результатами обработки информации, распечатанными на принтерах ЭВМ, и другие материалы, поясняющие те или иные стороны курсовой работы.

Оформление курсовой работы состоит в написании пояснительной записки и выполнении графического материала. Содержание пояснительной записки должно отражать все вопросы, которые согласно заданию на проектирование подлежат проработке, а графический материал – полностью соответствовать перечню, указанному в этом задании.

Требования к объёму пояснительной записки.

Пояснительная записка должна быть написана кратко, техническим языком. Объём её должен быть по возможности **минимальным**, но достаточным для понимания постановки задачи, аргументации выбираемых методов, пояснения решений, уяснения основных выводов. **Запрещается дублировать материал книг и методических разработок с целью придания пояснительной записке большего объёма.**

Графический материал должен быть выполнен в соответствии с действующими стандартами. Рекомендуется использовать форматы А3 или А4. Структурную схему алгоритма решения задачи на ЭВМ в большинстве случаев не удаётся выполнить на одном листе формата А3, поэтому можно использовать несколько последующих листов формата А3, а иногда и формата А4. Это позволит поместить графический материал в пояснительную записку после рубрики «Приложения» и представить все отчётные документы курсовой работы в компактном виде.

При доработке курсовой работы **полностью должны быть сохранены первые редакции (варианты)** пояснительной записки и графического матери-

ала **со всеми отмеченными замечаниями** в тексте записки и на листах графического материала. Доработка состоит в изложении нового видения только тех вопросов анализа, моделирования и т. п., по которым даны замечания, и в изображении только тех участков схем, где имеются неточности или грубые нарушения действующих стандартов. Например, если даны замечания по заполнению основной надписи (штампа) электрической схемы, то в качестве доработки достаточно привести лишь основную надпись или даже часть её с новыми правильными записями. Это же относится и к доработке вопросов, связанных с расчётами и моделированием. Ответу на каждый пункт замечаний следует давать заголовок по типу «Обоснование числа реализаций (доработка)» или же «Доработка по замечанию 1 (обоснование числа реализаций)», если замечания указаны в виде перечня пунктов, например, на листе «Содержание» или титульном листе. Страницы, на которых приводится доработка по замечаниям, необходимо подшить в начале пояснительной записки сразу после листа «Задание на курсовое проектирование». Это позволит преподавателю быстро сделать заключение о том, в какой степени студент устранил замечания.

2.5.2. Рекомендации по выполнению курсовой работы

Перед составлением (на бумаге или мысленно в памяти) плана выполнения работы необходимо ознакомиться с действующим документом «ПОЛОЖЕНИЕ об организации и проведении курсового проектирования в БГУИР», размещённом на сайте университета в разделе **Образование** на страничке **Информационная база УМУ** (ссылка: [Положение об организации и проведении курсового проектирования в БГУИР](#)).

План выполнения работы. Процесс выполнения курсовой работы можно условно разбить на такие этапы:

1. Ознакомление с основными понятиями, входящими в формулировку темы курсовой работы.
2. Постановка решаемой задачи.
3. Изучение расчётно-аналитического метода решения поставленной задачи и его применение для получения решения. Здесь использование ЭВМ не является обязательным.
4. Решение задачи методом моделирования на ЭВМ выходной характеристики или безотказности ФУ или устройства (собираетельно – объекта). Составляющие этого этапа:
 - изучение метода Монте-Карло в применении к моделированию точности или стабильности выходных характеристик ФУ либо показателей безотказности устройств;
 - разработка структурной схемы алгоритма моделирования объекта с учётом темы работы и выходной характеристики;
 - составление списка идентификаторов;
 - написание программы на языке программирования;

– отладка программы для ЭВМ, включая выполнение тестовой задачи (контрольного варианта).

5. Анализ результатов решения.

6. Формулировка выводов.

7. Оформление отчётных документов курсовой работы и подготовка к её защите.

При планировании самостоятельной работы рекомендуется воспользоваться данными о примерной трудоёмкости указанных этапов (табл. 2.4).

Таблица 2.4

Номер этапа	1	2	3	4	5	6	7
Трудоёмкость, %	3...5	15	10	45...50	5...10	5...10	20...25

Следует учесть, что в ряде случаев из-за недостаточного опыта написания и отладки программ для ЭВМ до 70...90 % времени выполнения этапа 4 («Решение задачи методом моделирования ...») может занять отладка программы.

С чего начинать? Получив задание на курсовое проектирование, студент нередко в течение нескольких недель не может его осмыслить. Происходит это из-за отсутствия необходимого объёма знаний по теме курсовой работы. Во многих случаях студент незнаком даже с терминами и понятиями, входящими в формулировку темы курсовой работы. Поэтому у студентов, получивших задание на курсовое проектирование, нередко возникает вопрос: с чего начинать?

Рекомендуется поступать так. Не вникая пока в исходные данные курсовой работы, по литературным источникам ознакомиться с терминами и понятиями, присутствующими в формулировке темы. Далее следует детально выяснить физический смысл основных понятий, их влияние на функционирование объекта, попытаться разобраться с теми факторами, которые оказывают влияние на интересующие выходные характеристики (показатели) объекта. Возьмем, к примеру, тему №1 «Сравнительная оценка точности выходного параметра, рассчитанной аналитически вероятностным методом и полученной моделированием на ЭВМ методом Монте-Карло с учётом производственного рассеивания параметров элементов». Вначале необходимо ознакомиться с понятием точность выходного параметра, уточнить, какие характеристики используются для количественного описания точности выходного параметра. Затем необходимо разобраться, что такое производственный разброс параметров элементов и каковы могут быть его закономерности. Далее следует выяснить, как он проявляется на рассеивании выходного параметра. После этого можно перейти к рассмотрению методов анализа точности выходного параметра.

Итак, когда основные понятия по теме курсовой работы усвоены, определены влияющие факторы и выяснено их значение для функционирования объекта, можно переходить к рассмотрению методов анализа интересующих характеристик (показателей). Если общая методика определения характеристик осмыслена, то можно выполнять следующий этап: «Постановка решаемой задачи».

Постановка задачи. Этот этап является достаточно важным. От удачной постановки задачи и её правильного понимания во многом зависит успех дальнейшего выполнения курсовой работы. Неправильная или некорректная постановка задачи чревата тем, что студент может затратить много времени впустую из-за того, что его дальнейшие действия принципиально неверны.

Постановка задачи обычно включает:

- определение исходных данных, необходимых для решения рассматриваемой задачи;
- уточнение (конкретизацию) характеристик, показателей, которые должны быть получены в результате решения данной задачи;
- формулировку решаемой задачи.

Определение исходных данных. При проектировании РЭУ специалисты, как правило, сталкиваются с нехваткой исходных данных. В то же время некоторые исходные данные могут оказаться не востребуемыми. Объясняется это тем, что исходные данные обычно задаются с позиций заказчика, который указывает общие требования и цели и те данные, которые для него важны в первую очередь. Определение недостающих (для проектирования) исходных данных ложится на плечи проектировщиков.

В заданиях на курсовое проектирование характер исходных данных приближен к реальным ситуациям, т. е. не все исходные данные, необходимые для решения задачи, включены в задание, а некоторые из них заданы в неявном виде. Например, для оценки точности выходного параметра РЭУ методом Монте-Карло необходимо знать основные количественные характеристики параметра элемента: математическое ожидание (обозначим как m) и среднее квадратическое отклонение (обозначим как σ). Эти характеристики в исходных данных не заданы, но указаны тип элемента, номинальное значение параметра и допуск. Следовательно, количественные характеристики m и σ параметра элемента могут быть (хотя бы примерно) получены путём анализа.

Или же ещё пример. В заданиях по оценке точности и стабильности выходных параметров РЭУ заданы типы элементов, номинальные значения параметров, допуски на параметры. Законы же распределения параметров и информация о температурных коэффициентах, а также коэффициентах старения параметров в заданиях в основном отсутствуют. Однако эти данные могут быть получены на основе анализа. В частности, законы распределения параметров могут быть выбраны исходя из видов элементов и ширины поля допуска, а информация о температурных коэффициентах и коэффициентах старения получена из нормативно-технической документации (НТД) на указанные типы элементов. В качестве НТД на элементы могут рассматриваться ГОСТы, технические условия (ТУ), паспорта, этикетки, справочники и т. п. На отдельные типы элементов в заданиях не указаны даже номинальные значения и допуски на параметры. Но зато указываются типы элементов, например стабилитрон КС139А. Нужные для расчета данные в этом случае могут быть взяты из справочников, т. е. исходные данные, по сути, заданы в неявном виде типом элемента.

Рекомендации по выполнению курсовой работы (на примере темы №1).

Рекомендации даны в предположении, что для описания точности выходного параметра ФУ РЭУ используют следующие количественные характеристики для относительной производственной погрешности выходного параметра $(\Delta y/y)_{\text{пр}}$:

$M(\Delta y/y)_{\text{пр}}$ – среднее значение (математическое ожидание) величины $(\Delta y/y)_{\text{пр}}$;

$\delta(\Delta y/y)_{\text{пр}}$ – половина поля рассеивания (допуска) величины $(\Delta y/y)_{\text{пр}}$.

Последовательность анализа точности расчётно-аналитическим вероятностным методом:

1. Ознакомиться с видами допусков, устанавливаемых на параметры, и основными понятиями, имеющими прямое отношение к теме проекта (точность параметров, количественные характеристики, используемые для описания точности, производственный допуск, систематическая и случайная составляющие допуска и др.) [1, с. 88–96].

2. По [1, с. 99–105] ознакомиться с расчётно-аналитическим вероятностным методом анализа точности выходного параметра.

3. Выполнить анализ исходных данных на курсовое проектирование, выяснить, каких исходные данные, необходимые для расчёта, отсутствуют.

Для многих типов полупроводниковых приборов (ППП) и интегральных микросхем (ИМС), а в некоторых случаях и для других элементов норма на параметры задаётся в виде нижнего или верхнего предельного отклонения параметра. Например, для операционных усилителей записи могут быть такими: «входное сопротивление не менее ... кОм», «коэффициент усиления не менее ...». Для биполярных транзисторов встречаются записи вида «обратный ток коллектора не более ... мкА», «коэффициент передачи тока в схеме с общим эмиттером не менее ...» и при необходимости указывается электрический режим измерения параметров. В приведённых записях многоточие (...) означает конкретное число.

Для того чтобы использовать параметры, в том числе указанные для ППП и ИМС в расчётах или математическом моделировании показателей РЭУ, необходимо знать основные количественные характеристики каждого параметра: математическое ожидание (обозначим его как m) и среднее квадратическое отклонение (обозначим через σ) или же половину поля рассеивания δ . Ориентировочные значения m и σ можно найти приёмами, проиллюстрированными в [10, с. 22–25].

4. При необходимости по литературным данным уточнить математическую модель ФУ РЭУ (математическое выражение, показывающее, как выходной параметр y связан с параметрами элементов x_1, x_2, \dots, x_n , где n – число параметров, включённых в модель.

5. Используя математическую модель ФУ РЭУ и средние значения параметров элементов $M(x_i) = m_i$, определить относительные коэффициенты влияния B_i параметров элементов [1, с. 95, формула (4.9)], включённых в математиче-

скую модель. Обязательно учесть, что в случае несимметричных допусков среднее значение $M(x_i)$ не совпадает с номинальным значением параметра $x_{i \text{ ном}}$.

6. Для каждого параметра x_i , из числа влияющих на y , определить следующие характеристики относительной производственной погрешности $(\Delta x_i/x_i)_{\text{пр}}$: среднее значение (математическое ожидание) $M(\Delta x_i/x_i)_{\text{пр}}$, половину поля допуска $\delta(\Delta x_i/x_i)_{\text{пр}}$ и значение коэффициентов K_i , характеризующих отличие законов распределения параметра x_i или, что тоже самое, величины $\Delta x_i/x_i$ от нормального закона [1, с. 102]. Далее надо выяснить, имеет ли место корреляция между каждой парой параметров из числа x_i или, что то же самое, между каждой парой величин $\Delta x_i/x_i$ ($i = 1, \dots, n$). Следует не забывать, что при симметричных допусках на параметры элементов величины $M(\Delta x_i/x_i)_{\text{пр}} = 0$.

7. Выбрать вероятность P_r , с которой гарантируется половина поля рассеивания величины $(\Delta y/y)_{\text{пр}}$. При анализе обычно выбирают коэффициент $\rho = 1$ [1, с. 101, формула (4.12)], что соответствует $P_r = 0,9973$.

8. Используя [1, с. 100, формула (4.10)], определить значение величины $M(\Delta y/y)_{\text{пр}}$. Если допуски на параметры элементов симметричны, то $M(\Delta y/y)_{\text{пр}} = 0$.

9. По [1, с. 101, формула (4.12)] рассчитать значение величины $\delta(\Delta y/y)_{\text{пр}}$. В указанную формулу величины $\delta(\Delta x_i/x_i)_{\text{пр}}$ обычно подставляют в процентах, значение $\delta(\Delta y/y)_{\text{пр}}$ получают сразу также в процентах.

10. Полученные значения величин $M(\Delta y/y)_{\text{пр}}$ и $\delta(\Delta y/y)_{\text{пр}}$ показывают, какой производственный разброс (в процентах относительно своего номинального уровня) будет иметь рассматриваемый параметр y . Производственный допуск устанавливают в виде

$$\Delta_{\text{пр}} = M(\Delta y/y)_{\text{пр}} \pm \delta(\Delta y/y)_{\text{пр}}. \quad (2.12)$$

Значение $\Delta_{\text{пр}}$ гарантируется такой вероятностью P_r , с которой определялась величина $\delta(\Delta y/y)_{\text{пр}}$.

Последовательность оценки точности выходного параметра методом Монте-Карло с учётом вероятностного рассеивания параметров элементов (в предположении отсутствия корреляции между параметрами):

1. Ознакомиться с методом Монте-Карло применительно к моделированию точности выходного параметра [1, с. 105–108].

2. Осмыслить структурную схему моделирования точности выходного параметра РЭУ методом Монте-Карло [1, с. 285, рис. 9.9 или с. 289, рис. 9.10].

3. Подготовить информацию, необходимую для получения на ЭВМ значений параметров элементов с учётом их производственного рассеивания.

Согласно табл. 2.1 реализации случайных параметров получают с помощью характеристик (параметров) законов распределения. Так, в случае нормального закона распределения $m = M(x_i)$, $\sigma = \sigma(x_i)$, а в случае равномерного закона: $a = x_{i \text{ н}}$, $b = x_{i \text{ в}}$, где $x_{i \text{ н}}$, $x_{i \text{ в}}$ – нижнее и верхнее значения параметра x_i .

Если допуск на первичный параметр симметричен, то математическое ожидание параметра $m_i = M(x_i)$ можно принять равным номинальному значению $x_{i \text{ ном}}$. При несимметричном допуске m_i определяется как

$$m_i = \frac{x_{iH} + x_{iB}}{2}. \quad (2.13)$$

Значение $\sigma_i = \sigma(x_i)$ в случае нормального закона распределения можно определить по выражению

$$\sigma_i \approx \frac{\delta_i}{3}, \quad (2.14)$$

где $\delta_i = \delta(x_i)$ – половина поля допуска (иначе – половина поля рассеивания) i -го параметра в его размерности.

4. Уточнить формулы получения (моделирования) случайных значений параметров. Для математического моделирования параметров элементов в случае нормального закона используют выражение

$$x_i = \sigma_i z_{iH} + m_i, \quad (2.15)$$

в случае закона равной вероятности – выражение

$$x_i = (x_{iB} - x_{iH})r + x_{iH}, \quad (2.16)$$

где z_{iH} – реализации стандартных нормально распределённых случайных чисел; в учебнике [1] эти числа обозначают также как x_{iH} ;

r – реализации стандартных равномерных случайных чисел в диапазоне (0...1).

Реализацию (т. е. одно значение) стандартных чисел z_{iH} рекомендуется получать по формуле [1, с. 268]

$$z_{iH} = \sum_{i=1}^{12} r_i - 6, \quad (2.17)$$

где i – индекс учёта стандартных равномерных случайных чисел r .

При использовании чисел z_{iH} их нужно принудительно ограничивать условием ($-3 \geq z_{iH} \geq +3$), т. к. при использовании формулы (2.17) существует вероятность того, что z_{iH} выйдет за пределы диапазона ($-3...+3$), что может исказить результаты моделирования.

5. Определить требуемое число реализаций устройства N .

Если интересующий показатель представляет собой среднее значение какой-то величины, например, среднее значение выходного параметра для тем, предусматривающих анализ точности и стабильности выходного параметра, или среднее время безотказной работы для тем, предусматривающих определение показателей безотказности, то для определения N можно воспользоваться формулой [1, с. 36, 108]

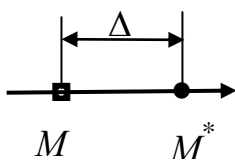
$$N \geq \frac{t_Y^2 \sigma^2(y)}{\Delta^2}, \quad (2.18)$$

где t_γ – коэффициент, зависящий от доверительной вероятности γ (обычно $\gamma = 0,95$, в этом случае $t_\gamma = 1,96$);

$\sigma(y)$ – среднее квадратическое отклонение (СКО) выходного параметра или времени безотказной работы, в общем случае – СКО случайной величины (обозначено как y), представляющей случайное значение рассматриваемой характеристики РЭУ;

Δ – допустимая ошибка в определении среднего значения (M^*) рассматриваемого показателя по результатам моделирования (рис. 2.7).

Значение $\sigma(y)$ обычно неизвестно. В этом случае выполняют некоторое число N_1 реализаций РЭУ и подсчитывают оценку СКО $\sigma^*(y)$ по классической формуле [1, с. 32]



$$\sigma^*(y) = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{N_1} [y_j - M^*(y)]^2}{N_1 - 1}}, \quad (2.19)$$

Рис. 2.7. Смысл допустимой ошибки Δ :
 M – истинное математическое ожидание (среднее значение) показателя; M^* – оценка математического ожидания показателя

где y_j – значение рассматриваемого показателя в j -й реализации РЭУ или процесса;

$M^*(y)$ – оценка математического ожидания (среднего значения) показателя, полученная с использованием N_1 реализаций.

Причём в качестве значения N_1 необходимо взять как минимум 1000 реализаций, поскольку выполняется математическое моделирование и затраты минимальны и слабо зависят от числа реализаций. Подсчитав оценку $\sigma(y)$, по выражению (2.18) рассчитывают N и проверяют условие $N_1 \geq N$. Если условие выполняется, то сделанное число реализаций N_1 уже достаточно. В противном случае проводят дополнительное число реализаций, уточняют значение $\sigma^*(y)$, снова пользуются формулой (2.18) и проверяют, достигло ли суммарное число сделанных реализаций значения последнего рассчитанного N . Так поступают до тех пор, пока этот факт не подтвердится.

При определении дополнительного числа реализаций вначале находят величину $\Delta N = N - N_1$, где N – значение, найденное по выражению (2.18), а затем округляют её в большую сторону до ближайшей тысячи. Во всех случаях желательно, чтобы выбираемое дополнительное число реализаций было больше найденной величины ΔN примерно на 30 %.

На требуемое число реализаций N заметно влияет допустимая ошибка Δ , см. формулу (2.18). Значение Δ , как правило, заказчиком не указывается. Выбор этой величины должен быть сделан разработчиком, т. е. студентом в процессе курсового проектирования.

Если интересующим показателем является математическое ожидание $M(y)$ выходного параметра РЭУ, то выбор значения Δ может быть сделан так. Исходя из начальных сведений (средних значений параметров элементов) или же по результатам обработки N_1 реализаций, определяют оценку $M^*(y)$. Далее,

принимая во внимание функциональное назначение РЭУ и физический смысл выходного параметра y , уточняют, какое значение половины поля допуска $\delta(y)_\phi$, устанавливаемое на этот параметр, исходя из функционального назначения, может быть приемлемым для практики. В качестве Δ следует взять такое значение, которое как минимум в 20...100 раз меньше $\delta(y)_\phi$:

$$\Delta \leq (0,01 \dots 0,05)\delta(y)_\phi. \quad (2.20)$$

Пример. Будем считать, что y есть выходное напряжение источника питания $U_{\text{вых}}$. Среднее значение $U_{\text{вых. ср}} = 5,0$ В. Предположим, исходя из служебного назначения источника питания в составе РЭУ, величина $\delta(y)_\phi$ должна составлять не более 2 %. Тогда

$$\delta(y)_\phi \leq (2/100) \cdot 5,0 = 0,1 \text{ В.}$$

Следовательно,

$$\Delta \leq (0,01 \dots 0,05) \cdot 0,1 = (0,001 \dots 0,005) \text{ В.}$$

2.5.3. Особенность определения показателей безотказности РЭУ

Методические указания даны в предположении, что для времени до отказа элементов РЭУ справедлив экспоненциальный закон распределения [1, с. 136–138].

Получение показателей безотказности расчётным способом:

1. По [1, с. 138–147] ознакомиться с показателями безотказности устройств, а по [1, с. 150–152] – с интенсивностью отказов как основной характеристикой безотказности элементов в случае экспоненциального распределения времени до отказа.

2. Изучить метод расчёта показателей безотказности РЭУ в случае справедливости для элементов экспоненциального закона надёжности и известных интенсивностей их отказов [1, с. 158–162].

3. Используя интенсивности отказов элементов, указанные в задании для рабочих условий применения, рассчитать следующие показатели безотказности РЭУ: среднее время безотказной работы $T_{\text{ср}}$, гамма-процентную наработку до отказа T_γ при указанном значении гамма, вероятность безотказной работы $P(t_3)$ за заданное время t_3 .

Примечание. Для выполнения пп. 1–3 можно также использовать источники [5, 11, 12].

Определение показателей безотказности РЭУ методом моделирования на ЭВМ отказов элементов в случае последовательной модели соединения элементов в РЭУ с точки зрения надёжности:

1. По [1, с. 291–293] изучить методы получения количественных показателей безотказности РЭУ, используя приёмы моделирования отказов элементов. Разобраться со структурной схемой моделирования безотказности РЭУ, приведённой в [1, с. 293, рис. 9.12].

2. Осмыслить формулу (вычислительный алгоритм) получения случайного времени до отказа элемента (см. формулу (2.3) табл. 2.2). Следует учесть, что

количественной характеристикой, получаемой при моделировании отказа i -го элемента, является его время до отказа t_i (иначе – время безотказной работы).

3. Разобраться с моделью, показывающей, как по значениям времени до отказа элементов $t_i^{(j)}$ в j -й реализации определяют время до отказа РЭУ в целом t_j в этой реализации (см. [1, с. 293, модель (9.35)]), $i=1, 2, \dots, n$, где n – количество элементов в составе РЭУ.

4. С помощью разработанной программы для ЭВМ выполнить многократно (N раз) моделирование времени до отказа элементов, входящих в РЭУ, и по модели (9.35), приведённой в [1], получить N значений времени до отказа РЭУ в целом $t_j, j=1, 2, \dots, N$.

5. Путём обработки результатов моделирования отказов РЭУ в целом (ряда t_1, t_2, \dots, T_N) определить показатели безотказности T_{cp} , и $P(t_3)$ [1, с. 291, формулы (9.33) и (9.34)]. Для определения значения показателя T_γ по результатам моделирования отказов РЭУ рекомендуется воспользоваться пособием [10, с. 39].

2.5.4. Описание работ, выполненных с применением ЭВМ

Описание разделов, выполненных с применением ЭВМ, должно включать:

- постановку задачи, решаемой на ЭВМ;
- алгоритмизацию задачи;
- список идентификаторов;
- указание об использованном алгоритмическом языке и типе ЭВМ;
- результаты решения, полученные с помощью ЭВМ, и их физическую интерпретацию.

Постановка задачи предполагает определение исходных данных, необходимых для решения задачи на ЭВМ, конкретизацию выходных данных (результатов) и формы их представления на выходных устройствах ЭВМ, а также чёткую формулировку самой задачи.

Алгоритмизация – это составление строго упорядоченной последовательности действий (правил) по обработке исходных данных с целью получения решения задачи. Для удобства составления программ на входных языках ЭВМ разрабатываются структурные схемы алгоритмов решения задачи, т. е. вычислительный алгоритм решения задачи представляется в графической форме. Вычислительный алгоритм – это обычно совокупность математических выражений (формул) и логических переходов. Алгоритмизация задачи должна дать ответ на вопрос, каков вычислительный алгоритм решения задачи на ЭВМ.

Структурная схема алгоритма решения задачи на ЭВМ – это графическое представление вычислительного алгоритма; разрабатывается для обеспечения удобства написания программ на входных языках ЭВМ. С целью развития логического мышления во всех курсовых работах должны быть разработаны и представлены структурные схемы алгоритмов решения задачи на ЭВМ. Назначение функциональных частей (блоков) или их групп должно быть пояснено в тексте, например так, как показано в табл. 2.5.

Таблица 2.5

Номера функциональных частей	Назначение
.....
3,12,13	Организация цикла по индексу i . Индексом учитываются параметры элементов $x_i, i = 1, \dots, n$
.....

Составление *списка идентификаторов* состоит в присвоении каждой переменной, участвующей в решаемой задаче, имени, под которым переменная будет фигурировать в программе для ЭВМ. Список идентификаторов следует оформить по примеру табл. 2.6.

Таблица 2.6

Обозначение параметра		Пояснение параметра в формулах, соотношениях
в формулах, соотношениях	в программе для ЭВМ	
$y^{(j)}$	$Y[J]$	Выходной параметр в j -й реализации
x_i	$X[I]$	Параметр i -го элемента
—	SS	Переменная для накопления суммы значений выходного параметра всех смоделированных ФУ РЭУ
...

Список идентификаторов можно составлять и до разработки структурной схемы алгоритма. В этом случае функциональные части структурной схемы могут быть пояснены с учётом идентификации параметров решаемой задачи. Имена параметрам удобно присваивать исходя из физической или логической сущности переменных. Например, удобно выходной параметр обозначить как Y , параметры элементов — как X , индексы для переменных — как I, J, K и т. д.

Программы для ЭВМ, используемые при выполнении курсовой работы, рекомендуется писать на одном из алгоритмических языков, которым было уделено внимание при обучении студентов специ-

альности «Техническое обеспечение безопасности».

Результаты решения задач на ЭВМ должны быть обязательно приведены в пояснительной записке (с целью их дальнейшего анализа), даже в случае, если на распечатке, полученной с помощью принтера ЭВМ, эти результаты представлены в удобочитаемой форме. Распечатка текста программы и результатов решения задачи, т. е. протокол выполнения программы, должны помещаться в приложение.

Физическая интерпретация результатов решения задачи выполняется с учётом специфики этой задачи и рассматриваемого объекта (устройства, системы).

При описании разделов, выполненных с помощью ЭВМ, **недопустимо**, не записав результаты решения и не сделав в тексте необходимых пояснений, адресовать читателя пояснительной записки к распечатке, полученной с помощью принтера ЭВМ. Примерным критерием удачного пояснения расчётов, выполненных на ЭВМ, является ясность исходных данных, понятность метода анализа и результатов решения задачи, их логической завершенности без обращения к распечатке, приведённой в приложении.

Литература

1. Боровиков, С. М. Теоретические основы конструирования, технологии и надёжности : учебник для инж.-техн. спец. вузов / С. М. Боровиков. – Минск : Дизайн ПРО, 1998. – 336 с.
2. 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. Кофанов, Ю. Н. Теоретические основы конструирования, технологии и надёжности РЭС : учебник для вузов / Ю. Н. Кофанов. – М. : Радио и связь, 1991. – 359 с.
4. Львович, Я. Е. Теоретические основы конструирования, технологии и надёжности РЭА : учеб. пособие для вузов / Я. Е. Львович, В. Н. Фролов. – М. : Радио и связь, 1986. – 192 с.
5. Яншин, А. А. Теоретические основы конструирования, технологии и надёжности ЭВА : учеб. пособие для вузов / А. А. Яншин. – М. : Радио и связь, 1983. – 312 с.
6. Фомин, А. В. Допуски в радиоэлектронной аппаратуре / А. В. Фомин, В. Ф. Борисов, В. В. Чермошенский. – М. : Сов. радио, 1973. – 129 с.
7. Зажигаев, Л. С. Методы планирования и обработки результатов физического эксперимента / Л. С. Зажигаев, А. А. Кишьян, Ю. И. Романиков. – М. : Атомиздат, 1978. – 232 с.
8. Адлер, Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Ю. В. Марков, Ю. В. Грановский. – М. : Наука, 1976. – 279 с.
9. Вайну, Я. Я. Корреляция рядов динамики / Я. Я. Вайну. – М. : Статистика, 1977. – 119 с.
10. Боровиков, С. М. Теоретические основы конструирования, технологии и надёжности : учеб.-метод. пособие к курсовому проектированию для студ. спец. «Моделирование и компьютерное проектирование РЭС» и «Проектирование и производство РЭС» всех форм обуч. / С. М. Боровиков, В. С. Колбун, Т. В. Малышева ; под ред. С. М. Боровикова. – Минск : БГУИР, 2004. – 55 с.
11. Боровиков, С. М. Расчёт показателей надёжности радиоэлектронных средств : учеб.-метод. пособие к курсовому проектированию по дисциплинам «Теоретические основы проектирования и надёжности РЭС» спец. «Моделирование и компьютерное проектирование РЭС» и «Теоретические основы конструирования, технологии и надёжности» спец. «Проектирование и производство РЭС» / С. М. Боровиков, И. Н. Цырельчук, Ф. Д. Троян; под ред. С. М. Боровикова. – Минск : БГУИР, 2009. – 69 с.
12. Надёжность технических систем : справочник / Ю. К. Беляев [и др.] ; под ред. И. А. Ушакова. – М. : Радио и связь, 1985. – 608 с.

Учебное издание

Боровиков Сергей Максимович
Шнейдеров Евгений Николаевич
Малышева Тамара Владимировна
Гришель Рафаил Петрович

ПРИМЕНЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ В ПРОЕКТИРОВАНИИ ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ

Методическое пособие по дисциплинам
«Основы математической теории планирования эксперимента»
и «Математические методы в проектировании технических изделий»
для студентов специальности «Техническое обеспечение безопасности»
заочной формы обучения

Редактор Н. В. Гриневич
Корректор Е. Н. Батурчик

Подписано в печать 14.10.2011.	Формат 60x84 1/16.	Бумага офсетная.
Гарнитура «Таймс».	Отпечатано на ризографе.	Усл. печ. л. 3,0.
Уч.-изд. л. 2,6.	Тираж 100 экз.	Заказ 40.

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. Бровки, 6