

Н.Ю. АФАНАСЬЕВА

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ НАУЧНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Рекомендовано ГОУ ВПО
«Московский государственный
технический университет им. Н.Э. Баумана»
в качестве **учебного пособия**
для студентов высших учебных заведений,
обучающихся по направлению подготовки 230100
«Информатика и вычислительная техника»



МОСКВА
2010

УДК 004.7(075.8)
ББК 32.973.202я73
А94

Рецензенты:

Ю.М. Руденко, доц. кафедры «Компьютерные системы и сети» МГТУ им. Н.Э. Баумана, канд. техн. наук,

М.А. Иванов, проф. кафедры «Компьютерные системы и технологии» МИФИ, д-р техн. наук,

Ю.К. Шелковников, заведующий отделом методов и средств исследования материалов и процессов в механике, д-р техн. наук, проф.

Афанасьева Н.Ю.

А94 Вычислительные и экспериментальные методы научного эксперимента : учебное пособие / Н.Ю. Афанасьева. — М. : КНОРУС, 2010. — 336 с.

ISBN 978-5-406-00176-9

Содержит сведения о вычислительных и экспериментальных методах научного эксперимента (планирование эксперимента, измерение, моделирование и идентификация моделей, цифровая обработка сигналов), используемых при создании информационно-измерительных систем с косвенными измерениями. Рассмотрены вопросы исследования моделей и объектов с использованием информационно-измерительных систем.

Для подготовки мастеров по специальности 230101 «Вычислительные машины, системы, комплексы и сети» (дисциплина «Математические и экспериментальные методы научного эксперимента») и студентов высшего профессионального образования по этой специальности (дисциплина «Методы научного эксперимента»).

УДК 004.7(075.8)
ББК 32.973.202я73

Афанасьева Наталья Юрьевна

**ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ
НАУЧНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА**

Санитарно-эпидемиологическое заключение
№ 77.99.60.953.Д.003365.04.09 от 01.04.2009 г.

Изд. № 1656. Подписано в печать 07.12.2009. Формат 60×90/16.

Гарнитура «NewtonС». Печать офсетная.

Усл. печ. л. 21,0. Уч.-изд. л. 12,0. Тираж 2000 экз. Заказ №

ООО «Издательство КноРус».

129110, Москва, ул. Большая Переяславская, 46, стр. 7.

Тел.: (495) 680-7254, 680-0671, 680-1278.

E-mail: office@knorus.ru <http://www.knorus.ru>

Отпечатано в ОАО «ИПК «Ульяновский Дом печати».

432980, г. Ульяновск, ул. Гончарова, 14.

ISBN 978-5-406-00176-9

© Афанасьева Н.Ю., 2010
© ООО «Издательство КноРус», 2010

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	7
Глава 1. Виды экспериментальных исследований и задачи их автоматизации	9
1.1. Качественный и количественный эксперименты	9
1.2. Лабораторный эксперимент.	10
1.3. Сложный исследовательский эксперимент.	10
1.4. Моделирование физических процессов	10
1.4.1. Масштабное моделирование.	10
1.4.2. Аналоговое моделирование	11
1.4.3. Полунатурное моделирование.	12
1.4.4. Математическое моделирование	12
1.5. Промышленный эксперимент	13
1.6. Типовая схема автоматизации экспериментальных исследований.	13
1.7. Роль ЭВМ в автоматизации эксперимента	15
1.8. Цели автоматизации экспериментальных исследований.	15
1.9. Эффективность автоматизированных систем	16
Глава 2. Элементы теории вероятностей и математической статистики	18
2.1. Случайные события	18
2.2. Дискретные и непрерывные случайные величины	19
2.3. Числовые характеристики и законы распределения случайных величин.	22
2.4. Закон больших чисел и центральная предельная теорема	26
2.5. Основы выборочного метода. Точечное и интервальное оценивание	28
2.6. Порядковые статистики	31
2.7. Эффективность и робастность оценок	34
2.8. Малая выборка	40
2.9. Законы распределения в случае нестабильных условий испытаний	42
2.10. Корреляционный анализ	48
2.10.1. Корреляционная зависимость. Различие задач корреляционного и регрессионного анализа	48
2.10.2. Коэффициент корреляции.	49
2.10.3. Корреляционное отношение и индекс корреляции	52

2.11. Регрессионный анализ	55
2.11.1. Линейная задача регрессии. Оценки максимального правдоподобия и по методу наименьших квадратов	55
2.11.2. Случай нормальной регрессии	57
2.11.3. Случай коррелированных погрешностей измерения	59
2.11.4. Нелинейная задача регрессии	59
2.11.5. Методы нахождения наилучшего уравнения регрессии	61
2.12. Проверка гипотез	66
2.13. Последовательный анализ	75
2.14. Методики испытаний	78
Глава 3. Погрешности измерений и обработка результатов	84
3.1. Классификация погрешностей измерений	84
3.2. Погрешности средств измерений и их нормирование	86
3.3. Постановка задачи обработки результатов измерений	87
3.4. Обработка результатов прямых измерений в случае нормального закона распределения погрешности	88
3.5. Обработка результатов прямых измерений в случае закона Лапласа распределения погрешности	89
3.6. Обработка результатов косвенных измерений	90
3.7. Обработка результатов совместных измерений	91
Глава 4. Определение допусков и обоснование допустимой погрешности измерений	92
4.1. Задачи допусков	92
4.2. Состояние вопроса и подход к назначению точности	96
4.3. Применение критерия, ограничивающего вероятность противоположных решений	99
Глава 5. Методы повышения точности измерений	104
5.1. Постановка задачи	104
5.2. Метод отрицательной обратной связи	105
5.3. Метод вспомогательных измерений	106
5.4. Итерационные методы	107
5.5. Методы образцовых мер	108
5.6. Тестовые методы	109
5.7. О точности в случае полиномиальной аппроксимации	112
Глава 6. Фильтрация сигналов	114
6.1. Аналоговые фильтры	114
6.2. Общая характеристика цифровых фильтров	118
6.3. Проектирование цифровых фильтров	121

6.4. Синтез цифровых фильтров по заданным временным характеристикам	121
6.5. Интегрирование и рекурсивные фильтры.	124
6.6. Дифференцирование и рекурсивные фильтры.	125
6.7. Метод наименьших квадратов и цифровые фильтры	126
6.8. Фильтры Баттерворта	135
6.9. Фильтры Чебышева.	138
6.10. Программирование фильтров	142
6.11. Замечания о свойствах и использовании фильтров	150
Глава 7. Обнаружение сигналов и измерение их параметров	154
7.1. Оптимальный обнаружитель сигнала	154
7.2. Оптимальный измеритель времени прихода сигнала известной формы	158
7.3. Оптимальный обнаружитель сигнала в случае окрашенного шума.	160
Глава 8. Идентификация моделей и объектов	162
8.1. Общие сведения	162
8.2. Методы идентификации и их классификация	164
8.3. Детерминированные методы экспериментального определения динамических характеристик объекта.	168
8.4. Статический метод определения динамических характеристик объекта в процессе нормальной эксплуатации	170
8.5. Способы решения уравнения Винера	172
8.5.1. Настраиваемый фильтр	172
8.5.2. Сведение уравнения Винера к алгебраическим уравнениям	173
8.5.3. Частотный метод.	174
8.6. Определение передаточной функции формирующего фильтра.	175
8.7. Определение автокорреляционной функции.	177
Глава 9. Метод статистических испытаний (моделирования)	180
9.1. Получение квазиравномерных псевдослучайных чисел на ЭВМ.	181
9.2. Статистическая проверка качества квазиравномерных псевдослучайных чисел	184
9.3. Моделирование случайных событий.	185
9.4. Моделирование случайных величин с заданным законом распределения.	187
9.5. Моделирование реализаций случайных векторов и случайных функций	191
9.6. Оценивание результатов статистического моделирования.	193
9.7. Применение математических программ при моделировании	194

Глава 10. Планирование экспериментов	195
10.1. Общие требования к плану и критерии планирования эксперимента	195
10.2. Активный эксперимент и ортогональные планы первого порядка	197
10.3. Обработка результатов экспериментов	200
10.4. Дробный факторный эксперимент	201
Заключение	204
Приложения	205
П1. Краткие сведения из матричной алгебры	205
П2. Число обусловленности и норма вектора и матрицы	207
П3. Принцип ортогональности и МНК	211
П4. Ортогональные полиномы (многочлены)	213
П5. Экстремум функции и функционала	215
П6. Временные методы анализа непрерывных систем	217
П7. Частотные методы анализа непрерывных систем	237
П8. Методы анализа импульсных систем	247
П9. Теория случайных функций	271
П10. Статистическая динамика линейных импульсных (дискретных) систем	278
П11. Математико-статистические таблицы	283
Образцы постановок лабораторных заданий	305
Библиографический список	321
Предметный указатель	326

ВВЕДЕНИЕ

Учебное пособие составлено на основе лекций по дисциплине «Математические и экспериментальные методы научного эксперимента», читаемых для студентов и магистров по направлению «Информатика и вычислительная техника».

Любой ученый в процессе теоретических и экспериментальных исследований стоит перед необходимостью разработки моделей и их идентификации, проведения экспериментов и регистрации их результатов, обработки результатов и принятия решений по результатам. Для составления моделей и интерпретации полученных при проведении эксперимента результатов необходимы знания в предметной области. Не углубляясь в предметную область, можно выделить ряд задач, возникающих в процессе организации и проведения научного эксперимента, являющихся общими и решаемых одними и теми же методами.

Поясним это на примере системы автоматизации научного эксперимента (САНЭ) с территориально разбросанными объектами. Объекты исследования с установленными на них датчиками соединены с центром приема и обработки линиями связи. Сигналы с датчиков представляют собой смесь полезного сигнала с шумом. При передаче по длинным линиям связи добавляются дополнительные шумы. В центре обработки сигналы с помощью аналого-цифровых преобразователей (АЦП) превращаются в дискретные данные, записываемые в ЭВМ для дальнейшей обработки. Шумы могут фильтроваться либо до дискретизации аналоговыми фильтрами, либо в ЭВМ цифровыми фильтрами.

В случае любого объекта необходимо оценить величину погрешностей измерений и принять меры к повышению точности измерений. В случае случайного объекта и зашумленных данных необходима статистическая обработка данных с построением доверительных интервалов, проверкой статистических гипотез и принятием решений.

При идентификации моделей необходимы знания из регрессивного анализа. Например, для сокращения числа опытов и повышения точности необходимо использовать теорию планирования экспериментов.

При исследовании моделей на ЭВМ методом статистических испытаний необходимо генерировать случайные события, величины и функции, а также оценивать их качество.

Следует отметить, что отдельные вопросы затрагиваются в ряде дисциплин для бакалавров по направлению «Информатика и вычислительная техника» (например, в дисциплинах «Теория вероятностей и математическая статистика», «Основы теории управления» и др.). Так как по указанным дисциплинам издано достаточное количество учебников, то мы сочли возможным не включать подробное изложение ряда вопросов в настоящее учебное пособие.

Не по всем темам можно найти лаконичные учебники, терминология отдельных разделов будет различной. В связи с этим нами сведены общие задачи в это пособие, что существенно облегчит читателям усвоение материала и минимизирует их затраты времени. Решению перечисленных общих задач посвящено настоящее учебное пособие.