

Е.А. Новиков, Ю.В. Шорников

КОМПЬЮТЕРНОЕ
МОДЕЛИРОВАНИЕ
ЖЕСТКИХ ГИБРИДНЫХ
СИСТЕМ

НОВОСИБИРСК
2013

УДК 004.9
Н 731

Рецензенты:

Заслуженный деятель науки РФ,
д-р техн. наук, профессор *В.И. Денисов*;
д-р физ.-мат. наук, гл. науч. сотр. ИВТ СО РАН *Л.Б. Чубаров*

Новиков Е.А.

Н 731 Компьютерное моделирование жестких гибридных систем :
монография / Е.А. Новиков, Ю.В. Шорников. – Новосибирск :
Изд-во НГТУ, 2013. – 451 с. (Серия «Монографии НГТУ»).

ISBN 978-5-7782-2023-2

Монография посвящена проблеме построения оригинальных численных методов решения задачи Коши для жестких систем обыкновенных дифференциальных уравнений. Особое внимание уделяется контролю точности вычислений и устойчивости численной схемы, а также созданию алгоритмов интегрирования переменного порядка и шага. Подробно рассматривается методология гибридных систем и приведена их классификация. Описаны возможности инструментальной среды машинного анализа гибридных моделей. На ряде практических задач продемонстрированы особенности использования разработанного программного комплекса.

Книга предназначена широкому кругу специалистов в области прикладной математики и численного анализа, а также всем тем, кто занимается инструментальным моделированием физических, химических, биологических и других процессов.

УДК 004.9

ISBN 978-5-7782-2023-2

© Новиков Е.А., Шорников Ю.В., 2012, 2013
© Новосибирский государственный
технический университет, 2012, 2013

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	5
Глава 1. НЕКОТОРЫЕ СВЕДЕНИЯ ИЗ ТЕОРИИ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ.....	25
1.1. Постановка задачи.....	25
1.2. Существование и единственность решения.....	26
1.3. Зависимость решения от начальных данных.....	27
1.4. Устойчивость по Ляпунову.....	28
1.5. Функция Ляпунова.....	29
1.6. Устойчивость положений равновесия линейной системы.....	30
1.7. Устойчивость положений равновесия нелинейных систем.....	31
1.8. Устойчивость неавтономных систем.....	32
Глава 2. КОНТРОЛЬ ТОЧНОСТИ И УСТОЙЧИВОСТИ ОДНОШАГОВЫХ МЕТОДОВ.....	35
2.1. Основные определения.....	36
2.2. Контроль точности вычислений.....	43
2.3. Контроль устойчивости.....	53
2.4. Реализация явных методов.....	58
Глава 3. АЛГОРИТМЫ ИНТЕГРИРОВАНИЯ С КОНТРОЛЕМ ТОЧНОСТИ НА ОСНОВЕ ЯВНЫХ МЕТОДОВ.....	63
3.1. Явный метод Эйлера.....	63
3.2. Метод трапеций.....	65
3.3. Методы типа Рунге–Кутты.....	71
3.4. Методы типа Рунге–Кутты второго порядка точности.....	76
3.5. Методы типа Рунге–Кутты третьего порядка точности.....	82
3.6. Метод Рунге–Кутты–Мерсона.....	87
Глава 4. АЛГОРИТМЫ ИНТЕГРИРОВАНИЯ С КОНТРОЛЕМ УСТОЙЧИВОСТИ ЧИСЛЕННОЙ СХЕМЫ.....	91
4.1. Схемы второго порядка точности.....	92
4.2. Схема третьего порядка точности.....	96
4.3. Схемы четвертого и пятого порядков точности.....	97

Глава 5. АЛГОРИТМЫ ИНТЕГРИРОВАНИЯ ПЕРЕМЕННОГО ПОРЯДКА И ШАГА.....	103
5.1. Алгоритм на основе трехстадийной схемы.....	103
5.2. Алгоритм с применением стадий метода Рунге–Кутты–Мерсона.....	111
5.3. Алгоритм с применением стадий метода Рунге–Кутты–Фельберга пятого порядка	123
5.4. Алгоритм с применением стадий метода Рунге–Кутты–Фельберга седьмого порядка	132
5.5. Алгоритм с применением стадий метода Дорманда–Принса восьмого порядка	142
5.6. Алгоритм на основе двухстадийной схемы.....	154
5.7. Многочлены устойчивости.....	159
Глава 6. МЕТОДЫ ТИПА РОЗЕНБРОКА	177
6.1. Численные схемы	177
6.2. Алгоритмы интегрирования на основе двухстадийной численной схемы	182
6.3. Замораживание матрицы Якоби в методах типа Розенброка	185
Глава 7. КЛАСС (m, k) -МЕТОДОВ	193
7.1. Численные схемы	193
7.2. Ряды Тейлора для стадий методов.....	195
7.3. Численные схемы с одним вычислением правой части	197
7.4. Общие положения.....	198
7.5. Методы решения линейных задач.....	200
7.6. Методы решения нелинейных задач. Схемы с одним вычислением правой части	207
7.7. Методы решения нелинейных задач. Схемы с двумя вычислениями правой части	209
7.8. Замораживание матрицы Якоби в $(3, 2)$ -методе решения жестких задач.....	221
Глава 8. ИССЛЕДОВАНИЕ $(m, 3)$ -МЕТОДОВ	227
8.1. Обозначения.....	227
8.2. A -устойчивый $(m, 3)$ -метод пятого порядка точности.....	231
8.3. L -устойчивый $(m, 3)$ -метод пятого порядка точности	237
8.4. Теорема о максимальном порядке точности $(m, 3)$ -методов	243
8.5. Теорема о максимальном порядке точности $(m, 3)$ -методов с замораживанием матрицы Якоби.....	244

Глава 9. ГИБРИДНЫЕ СИСТЕМЫ.....	265
9.1. Дискретно-непрерывная модель.....	265
9.2. Эффект Зенона	267
9.3. Режимы и события.....	270
9.4. Локальное и глобальное поведение	273
9.5. Разрывы	277
9.6. Анализ событийно-непрерывных систем.....	279
9.7. Классификация событий	282
9.8. Инструментально-ориентированный анализ.....	289
Глава 10. КОРРЕКТНОЕ ОБНАРУЖЕНИЕ ДИСКРЕТНЫХ СОБЫТИЙ.....	297
10.1. Области неопределенности гибридной модели	297
10.2. Проблема корректного обнаружения дискретных событий	298
10.3. Линеаризация и метод установления в локализации событий	301
10.4. Обеспечение асимптотического приближения к пограничной поверхности в явных разностных схемах.....	304
10.5. Метод Адамса в обнаружении событий	309
10.6. L -устойчивый метод в обнаружении событий	313
10.7. Обнаружение событий инструментальными средствами	319
Глава 11. АДАПТИВНЫЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ РЕЖИМОВ ГИБРИДНЫХ СИСТЕМ ПОВЫШЕННОЙ ЖЕСТКОСТИ.....	321
11.1. Обнаружение жесткости	321
11.2. Неявный метод с контролем жесткости.....	323
11.3. Явный метод переменного порядка и шага	324
11.4. Инструментально-ориентированный анализ режимов повышенной жесткости	327
Глава 12. ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ.....	331
12.1. Визуальные компьютерные модели.....	331
12.2. Символьные компьютерные модели.....	336
12.3. Структурно-символьные компьютерные модели	346
12.4. Реализация компьютерных моделей	349
12.5. Графическая интерпретация результатов машинных экспериментов	363
12.6. Особенности программирования гибридных систем	365

Глава 13. УНИФИКАЦИЯ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ	367
13.1. Актуальность и постановка задач	367
13.2. Формирование дифференциальных уравнений химической кинетики	369
13.3. Синтаксис	370
13.4. Семантика.....	373
13.5. Спецификация сложных химических реакций	374
13.6. Особенности унификации.....	381
Глава 14. ИНСТРУМЕНТАЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННЫЙ АНАЛИЗ ГИБРИДНЫХ СИСТЕМ	383
14.1. Система автосопровождения	383
14.2. Кольцевой модулятор.....	388
14.3. Биосистемы	393
14.4. Машинный анализ систем высокой размерности	409
14.5. Компьютерное моделирование роста и дифференциации растительной ткани	414
Библиографический список.....	418