

Содержание

Введение	31
Благодарности и адреса для связи	36
Урок 1. Краткое введение в математическое моделирование	37
1.1. Основные понятия моделирования	38
1.1.1. Значение математического моделирования	38
1.1.2. Основные виды моделей	39
1.1.3. Основные свойства моделей	40
1.1.4. Цели моделирования	40
1.2. Источники воздействий и сигналы	40
1.2.1. Понятие о сигналах	40
1.2.2. Синусоидальный сигнал	41
1.2.3. Дельта-функция Дирака и функция Хевисайда	41
1.3. Технология моделирования	42
1.3.1. Комплексное моделирование	42
1.3.2. Основные методы решения задач моделирования	43
1.3.3. Погрешности моделирования	43
1.3.4. Оценка обусловленности вычислительной задачи	44
1.3.5. Вычислительные методы в моделировании	45
1.3.6. Контроль правильности модели	45
1.4. Моделирование линейных динамических объектов и систем	46
1.4.1. Идентификация динамических объектов	46
1.4.2. О моделировании линейных систем	47
1.4.3. Простая линейная модель RC-цепи	47

1.4.4. Передаточная функция	48
1.4.5. Импульсная характеристика (ИХ) $w(t)$	49
1.4.6. Переходная характеристика, или функция $h(t)$	49
1.4.7. Свертка и интеграл свертки	49
1.4.8. Основы спектрального анализа и синтеза	50
1.4.9. Частотные характеристики	52
1.5. Моделирование нелинейных объектов и систем	53
1.5.1. Дифференциальное уравнение	53
1.5.2. Модель для переменных состояния	54
1.6. Моделирование дискретных систем	54
1.6.1. Дискретные модели и Z-преобразования	54
1.6.2. Дискретные модели переменных состояния	55
1.6.3. Некоторые понятия статистического моделирования	56
1.6.4. Дискретные модели, учитывающие шум наблюдения	57

Урок 2. Simulink – пакет визуального математического моделирования

59

2.1. Основные возможности пакета Simulink	60
2.1.1. Назначение пакета	60
2.1.2. Общие возможности Simulink	63
2.1.3. Дополнительные возможности Simulink	63
2.1.4. Новые возможности Simulink 5.*	64
2.1.5. Новые возможности Simulink 6.*	64
2.1.6. Новые возможности Simulink 7	66
2.2. Запуск Simulink и основы работы с пакетом	67
2.2.1. Интеграция пакета Simulink с системой MATLAB	67
2.2.2. Запуск моделей Simulink из среды MATLAB	69
2.2.3. Особенности интерфейса Simulink	70
2.3. Работа с демонстрационными примерами	70
2.3.1. Поиск и загрузка модели аттрактора Лоренца	70

2.3.2. Установка параметров компонентов модели	71
2.3.3. Установка параметров моделирования	72
2.3.4. Запуск процесса моделирования	75
2.3.5. Решение дифференциальных уравнений Ван-дер-Поля	76
2.3.6. Изменение характера нелинейности модели	77
2.3.7. Как добавить в модель графопостроитель	78
2.4. Работа с редактором дифференциальных уравнений	81
2.4.1. Решение уравнений Ван-дер-Поля	81
2.4.2. Решение уравнений аттрактора Лоренца	81
2.5. Дополнительные примеры моделирования	82
2.5.1. Моделирование кубика с пружинкой	82
2.5.2. Информационное обеспечение примера	83
2.5.3. Моделирование системы терморегулирования дома	84
2.5.4. Использование субмоделей	84
2.5.5. Моделирование работы унитаза	85
2.6. Дополнительные возможности	88
2.6.1. Применение логических операций	88
2.6.2. Визуальный контроль типов данных	89
2.7. Особенности реализации Simulink 6	90
2.7.1. Новые разделы библиотеки Simulink 6	90
2.7.2. Подборка блоков из ящиков Blockset и Toolbox	92
2.7.3. Новое окно установки параметров моделирования	93
2.7.4. Новые кнопки на панели инструментов Simulink	94
2.7.5. Новый навигатор моделей Model Explorer	94
2.7.6. Расширение меню Tools	95
2.7.7. Справочная система Simulink 6 и работа с ней	96
2.8. Интерфейс пакета расширения Simulink 7	97
2.8.1. Справка по Simulink 7	97
2.8.2. Браузер библиотек Simulink 7	98
2.8.3. О составе блоков библиотеки Simulink 7	99
2.8.4. Доступ к демонстрационным примерам Simulink 7	100

Урок 3. Работа Simulink с файлами	107
3.1. Интерфейс браузера библиотек	108
3.1.1. Окно браузера библиотек Simulink 5	108
3.1.2. Состав основной библиотеки блоков	109
3.1.3. Заголовок и строка состояния	110
3.1.4. Меню окна браузера библиотек	110
3.1.5. Настройка параметров Simulink	110
3.1.6. Меню Edit браузера библиотек.....	112
3.1.7. Меню View браузера библиотек	113
3.1.8. Справка по браузеру библиотек	114
3.1.9. Панель инструментов окна браузера библиотек	115
3.2. Интерфейс окна моделей Simulink.....	115
3.2.1. Панель инструментов окна моделей	115
3.2.2. Основное меню пакета Simulink	116
3.2.3. Меню File окна модели	116
3.2.4. Контроль источников	117
3.2.5. Вывод окна свойств текущей модели	117
3.3. Печать текущей модели	118
3.3.1. Вывод окна печати модели.....	118
3.3.2. Настройка принтера.....	118
3.4. Особенности Simulink 6/7	120
3.4.1. Новое окно Preferences Simulink 6/7	120
3.4.2. Новое окно обозревателя модели Simulink 6/7	123
3.4.3. Окно модели Simulink 6/7 и контекстное меню	124
3.4.4. Пуск модели в Simulink 6/7	125
Урок 4. Подготовка и запуск модели	129
4.1. Создание модели	130
4.1.1. Постановка задачи и начало создания модели	130
4.1.2. Ввод текстовой надписи	130

4.1.3. Размещение блоков в окне модели	130
4.1.4. Выделение блока модели	131
4.1.5. Меню редактирования Edit	132
4.1.6. Применение буфера обмена	133
4.1.7. Выделение ряда блоков и их перенос	135
4.1.8. Запуск нескольких моделей одновременно	136
4.2. Моделирование ограничителя	137
4.2.1. Постановка задачи	137
4.2.2. Создание и запуск модели ограничителя	138
4.2.3. Настройка масштаба осциллограмм	139
4.2.4. Сохранение модели	141
4.2.5. Модернизация и расширение модели	141
4.3. Основные приемы подготовки и редактирования модели	142
4.3.1. Добавление надписей и текстовых комментариев	144
4.3.2. Выделение, удаление и восстановление объектов	146
4.3.3. Вставка блоков и их соединение	147
4.3.4. Создание отвода линии	148
4.3.5. Удаление соединений	150
4.3.6. Изменение размеров блоков	150
4.3.7. Перемещение блоков и вставка блоков в соединение ...	150
4.3.8. Моделирование дифференцирующего устройства	151
4.3.9. Команды Undo и Redo в окне модели	152
4.4. Операции форматирования модели	153
4.4.1. Меню форматирования Format	153
4.4.2. Примеры форматирования модели	153

Урок 5. Блоки источников

и получателей сигналов

5.1. Источники простых сигналов и воздействий	156
5.1.1. Общий обзор источников	156

5.1.2. Источник постоянного воздействия Constant	157
5.1.3. Источник синусоидального воздействия Sine Wave	159
5.1.4. Источник нарастающего воздействия Ramp	160
5.1.5. Источник одиночного перепада Step	160
5.1.6. Источник прямоугольных импульсов Pulse Generator	162
5.1.7. Земля Ground	163
5.2. Источники шумовых воздействий	163
5.2.1. Источник случайного сигнала с нормальным распределением Random Number	163
5.2.2. Источник случайного сигнала с равномерным распределением Uniform Random Number	163
5.2.3. Генератор белого шума Band Limited White Noise	165
5.3. Источники сложных сигналов	165
5.3.1. Повторяющаяся последовательность Repeating Sequence	165
5.3.2. Сигнал-генератор Signal Generator	166
5.3.3. Генератор нарастающей частоты Chirp Generator	166
5.3.4. Конструктор сигналов	168
5.4. Источники системных данных	169
5.4.1. Источник времени моделирования Clock	169
5.4.2. Цифровой источник времени Digital Clock	169
5.4.3. Блок получения данных из файлов From File	170
5.4.4. Блок получения данных из рабочего пространства From Workspace	171
5.4.5. Блок входа In	172
5.5. Виртуальные регистраторы	174
5.5.1. Обзор блоков приема данных	174
5.5.2. Виртуальный осциллограф	175
5.5.3. Виртуальный «плавающий» осциллограф	178
5.5.4. Виртуальный графопостроитель XY Graph	179
5.5.5. Дисплей Display	179
5.6. Другие блоки группы Skins	180

5.6.1. Заглушка Terminator	180
5.6.2. Задание выхода Out* и создание подсистемы	182
5.6.3. Блок остановки моделирования Stop	184
5.6.4. Блок сохранения данных в файле To File	185
5.6.5. Блок сохранения данных в рабочем пространстве To Workspace	187
5.7. Библиотека Signal Routing	188
5.7.1. Обзор библиотеки Signal Routing	188
5.7.2. Блок создания шины Bus Creator	189
5.7.3. Блок шинного селектора Bus Selector	190
5.7.4. Блок выбора последнего сигнала Merge	191
5.7.5. Блок мультиплексирования Mux.....	192
5.7.6. Блок демультимплексирования Demux.....	192
5.7.7. Блоки для записи и считывания данных Data Store Memory, Data Store Write и Data Store Read	193
5.7.8. Блоки «беспроводной» связи From, Goto и Goto Tag Visibility	195
5.7.9. Ручной переключатель сигналов Manual Switch.....	197
5.7.10. Управляемый переключатель сигналов Switch	198
5.7.11. Многопортовый переключатель сигналов Multiport Switch	200
5.7.12. Селектор Selector	201
5.8. Библиотека атрибутов сигналов Signal Attribute	202
5.8.1. Состав библиотеки атрибутов сигналов	202
5.8.2. Блок преобразования типов сигналов Data Type Conversion	202
5.8.3. Установка начального значения сигнала IC	204
5.8.4. Блок согласования дискретных значений Rate Transition	204
5.8.5. Блок спецификации сигнала Signal Specification	206
5.8.6. Блок проверки сигналов Probe	207
5.8.7. Блок вычисления размера сигнала Width	207
5.9. Новые источники в Simulink 6.6	208

5.9.1. Окно источников сигналов Simulink 6.6	208
5.9.2. Источник Repeating Sequence Stair	208
5.9.3. Источник Repeating Sequence Interpolated	208
5.9.4. Источник Counter Free-Running	209
5.9.5. Источник Counter Limited	209

Урок 6. Математические блоки 211

6.1. Математическая библиотека Math	212
6.1.1. Обзор библиотеки Math	212
6.1.2. Блоки выполнения арифметических операций	213
6.1.3. Блоки вычисления элементарных функций	215
6.1.4. Блок выполнения логических операций Logical Operation	215
6.1.5. Блок выполнения побитовых логических операций Bitwise Logical Operator	217
6.1.6. Блок выполнения операций по таблице истинности Combinatorial Logic	217
6.1.7. Блоки масштабирования Gain и Slider Gain	219
6.1.8. Блоки Complex to Magnitude-Angle и Complex to Real-Imag	220
6.1.9. Блоки Real-Image to Complex и Magnitude-Phase to Complex	221
6.1.10. Блок поиска минимума и максимума MinMax	222
6.1.11. Блок алгебраического ограничения Algebraic Constraint	222
6.1.12. Матричные блоки Assignment, Matrix Concatenation и Reshape	224
6.1.13. Блок вычисления значений полинома Polynomial	225
6.2. Библиотека непрерывных блоков Continuous	226
6.2.1. Раздел библиотеки Continuous	226
6.2.2. Дифференцирующий блок Derivative	227
6.2.3. Интегрирующий блок Integrator	228
6.2.4. Блок задания линеаризованной модели State-Space	229

6.2.5. Блок передаточной характеристики Transfer Fcn	230
6.2.6. Блок Zero-Pole	231
6.2.7. Блок фиксированной задержки Transport Delay	232
6.2.8. Блок управляемой задержки Variable Transport Delay	232
6.3. Блоки задания таблиц	234
6.3.1. Обзор блоков таблиц	234
6.3.2. Блок одномерной таблицы Look-Up Table	235
6.3.3. Блок двумерной таблицы Look-Up Table (2D)	237
6.3.4. Блок многомерной таблицы Look-Up Table (n-D)	238
6.3.5. Блок Interpolation (n-D) using PreLoop-Up	239
6.3.6. Блок таблицы с прямым доступом Direct Loop-Up Table (n-D)	240
6.3.7. Блок работы с индексами PreLook-Up Index Search	241
6.4. Блоки задания функций пользователя	242
6.4.1. Обзор функций пользователя	242
6.4.2. Блок задания функции Fcn	243
6.4.3. Блок задания функции MATLAB Fcn	244
6.4.4. Блок задания S-функций	244
6.4.5. Примеры применения S-функций	246
6.4.6. Блок создания S-функций S-Function Builder	247
6.5. Новые блоки библиотеки Simulink 6/7	248
6.5.1. Расширенная библиотека математических блоков	248
6.5.2. Блоки раздела Logic and Bit Operations	249
6.5.3. Блоки раздела Additional Math & Discrete	250

Урок 7. Нелинейные, дискретные и специальные блоки	255
7.1. Нелинейные блоки	256
7.1.1. Обзор нелинейных блоков	256
7.1.2. Блок ограничения Saturation	257

7.1.3. Блок с зоной нечувствительности Dead Zone	258
7.1.4. Релейный блок Relay	258
7.1.5. Блок с ограничением скорости Rate Limiter	259
7.1.6. Блок квантования Quantizer	260
7.1.7. Блок фрикционных эффектов Coulombic and Viscous Friction	261
7.1.8. Блок люфта Backlash	261
7.1.9. Детектор пересечения заданного уровня Hit Crossing ...	263
7.2. Дискретные блоки	264
7.2.1. Обзор дискретных блоков	264
7.2.2. Блок дискретной единичной задержки Unit Delay	264
7.2.3. Блок экстраполятора нулевого порядка Zero-Order Hold	264
7.2.4. Блок экстраполятора первого порядка First-Order Hold	265
7.2.5. Блок дискретного интегратора времени Discrete-Time Integrator	266
7.2.6. Блок дискретного фильтра Discrete Filter	267
7.2.7. Блок памяти Memory	268
7.2.8. Блок дискретной передаточной функции Discrete Transfer Fcn	268
7.2.9. Блок задания дискретной функции Discrete Zero Pole	270
7.2.10. Блок Discrete State Space	270
7.3. Библиотеки Simulink Extras	271
7.3.1. Обзор библиотеки Simulink Extras	271
7.3.2. Дополнительные дискретные блоки Additional Discrete	272
7.3.3. Дополнительные линейные блоки	272
7.3.4. Дополнительные блоки Additional Sinks	275
7.3.5. Блоки спектрального анализа	275
7.3.6. Блок кросс-коррелятора Cross-Correlator	277
7.3.7. Блок автокоррелятора Cross-Correlator	278
7.3.8. Обзор раздела библиотеки Flip Flops	278
7.3.9. Генератор тактовых импульсов Clock	280

7.3.10. Триггерные блоки	280
7.3.11. Пример построения широтно-импульсного модулятора	280
7.3.12. Раздел Linearization	282
7.3.13. Блок заданной временной задержки	283
7.4. Блоки преобразований	284
7.4.1. Обзор раздела преобразований Transformations	284
7.4.2. Блок преобразования температуры Celsius to Fahrenheit	284
7.4.3. Блок преобразования температуры Fahrenheit to Celsius	285
7.4.4. Блок преобразования углов Degress to Radians	285
7.4.5. Блок преобразования углов Radians to Degress	285
7.4.6. Блок преобразования координат Cartesian to Polar	286
7.4.7. Блок преобразования координат Polar to Cartesian	287
7.4.8. Блок преобразования 3D-координат Cartesian to Spherical	287
7.4.9. Блок преобразования 3D-координат Spherical to Cartesian	287
7.5. Библиотека верификации модели – Model Verification ...	289
7.5.1. Обзор блоков библиотеки Model Verification	289
7.5.2. Блоки контроля со статическими уровнями	289
7.5.3. Блоки динамического контроля	291
7.5.4. Блок контроля нуля Assertion	292
7.5.5. Блок контроля градиента дискретного сигнала Check Discrete Gradient	293
7.5.6. Блок контроля разрешения Check Input Resolution	294
7.6. Библиотека дополнительных утилит Model-Wide Utilities	295
7.6.1. Обзор блоков библиотеки Model-Wide Utilities	295
7.6.2. Блок линеаризации модели в заданное время Times-Based Linearization	296
7.6.3. Блок линеаризации с запуском Trigger-Based Linearization	296

7.6.4. Блок задания информации о модели – Model info	297
7.6.5. Блок документирования модели – DocBlock	299
7.7. Новые нелинейные и дискретные блоки Simulink 6	299
7.7.1. Новые нелинейные блоки Simulink 6.6	299
7.7.2. Новые дискретные блоки Simulink 6.6	301

Урок 8. Подготовка и применение

подсистем	303
8.1. Общие сведения о подсистемах	304
8.2. Создание подсистемы из части основной модели	304
8.2.1. Постановка задачи о выделении подсистемы	304
8.2.2. Выделение блоков для подсистемы	305
8.2.3. Создание подсистемы из выделенных блоков	306
8.2.4. Вызов и просмотр подсистемы	307
8.2.5. Назначение портов ввода и вывода в подсистемах	307
8.2.6. Использование браузера моделей для работы с подсистемами	308
8.2.7. Модификация и редактирование подсистемы	309
8.2.8. Задание свойств подсистемы	310
8.2.9. Параметры портов ввода и вывода	311
8.2.10. Обзор библиотеки Ports & SubSystem	312
8.3. Построение подсистем на основе блока SubSystem	314
8.3.1. Постановка задачи	314
8.3.2. Модель функционального генератора	314
8.3.3. Задание подсистемы с помощью блока SubSystem	314
8.3.4. Создание основной модели и ее испытание	315
8.4. Управляемые подсистемы	316
8.4.1. Типы управляемых подсистем	316
8.4.2. Пример создания E-подсистемы функционального генератора	318
8.4.3. Создание порта выхода E-подсистемы	318

8.4.4. Т-подсистемы	319
8.4.5. Пример применения Т-подсистемы	320
8.4.6. ЕТ-подсистемы	322
8.4.7. Применение блоков Goto, Goto Tag visibility и From	323
8.5. Особенности применения подсистем	325
8.5.1. Виртуальные подсистемы	325
8.5.2. Невиртуальные подсистемы	326
8.5.3. Семантика подсистем	326
8.5.4. Демонстрационные примеры применения подсистем ...	327
8.6. Маскированные подсистемы	331
8.6.1. Механизм маскирования	331
8.6.2. Создание начальной модели	333
8.6.3. Подготовка к маскированию подсистемы	333
8.6.4. Запуск редактора маски	334
8.7. Работа с масками	335
8.7.1. Редактор маски	335
8.7.2. Создание окна параметров блока	336
8.7.3. Инициализация параметров	338
8.7.4. Подготовка описания и документации блока	339
8.7.5. Создание простой пиктограммы блока	340
8.7.6. Проверка модели с созданной маской	342
8.7.7. Вывод описания и справки маски	343
8.7.8. Создание маски-справки	343
8.8. Расширенные средства создания пиктограмм блоков	344
8.8.1. Задание текстовых надписей	344
8.8.2. Применение команд графики MATLAB	346
8.8.3. Средства специального оформления пиктограмм	347
8.8.4. Применение графического редактора пиктограмм	348
8.8.5. Задание пиктограммы в виде готового рисунка	351
8.9. Создание библиотек пользователя	352
8.9.1. Библиотека Commonly Used Simulink 6	352

8.9.2. Требования к библиотекам пользователя	353
8.9.3. Перенос блоков в окно библиотеки	353
8.9.4. Применение библиотек пользователя	355

Урок 9. Инструменты и практика

моделирования 357

9.1. Меню инструментов Tools	358
9.1.1. Роль инструментальных средств Simulink	358
9.1.2. Меню инструментов Tools	358
9.2. Работа с отладчиком графических S-моделей	359
9.2.1. Запуск отладчика	359
9.2.2. Панель инструментов отладчика	359
9.2.3. Работа с отладчиком	361
9.2.4. Дополнительные возможности отладчика	363
9.2.5. Проверка порядка выполнения блоков	363
9.2.6. Оценка состояния отладчика	363
9.2.7. Управление отладчиком из командной строки MATLAB	364
9.3. Браузер данных Simulink	366
9.4. Подготовка отчетов по моделированию	367
9.4.1. Что такое отчет?	367
9.4.2. Установки просмотра отчета	368
9.4.3. Запуск генератора отчетов	369
9.4.4. Редактирование отчета	369
9.4.5. Пример подготовки отчета	370
9.5. Инструменты ускорения моделирования	372
9.5.1. Профилировщик Profiler	372
9.5.2. Применение Simulink-ускорителя	374
9.5.3. Дискретизация моделей	377
9.6. Работа с LTI-вьювером	378
9.6.1. Вызов LTI-вьювера командой Linear analysis... ..	378

9.6.2. Выбор состояния системы	379
9.6.3. Выбор графических характеристик линейных систем ...	380
9.6.4. Конфигурация вывода графиков	381
9.6.5. Пример линеаризации нелинейной системы	383
9.7. Повышение эффективности и качества моделирования	384
9.7.1. Дополнительные средства в позиции Tools меню	384
9.7.2. Повышение скорости моделирования	385
9.8. Практические примеры моделирования	390
9.8.1. Построение спирали Карно	390
9.8.2. Синтез АМ-сигнала	391
9.8.3. Нестабильные линейные системы с обратной связью ...	392
9.8.4. Получение незатухающих почти синусоидальных колебаний	393
9.9. Демонстрационные примеры Simulink	395
9.9.1. Доступ к демонстрационным примерам Simulink	395
9.9.2. Моделирование простого маятника	396
9.9.3. Колебания многозвенного объекта	397
9.9.4. Моделирование отскакивающего от поверхности мячика	398
9.9.5. Моделирование автопилота с аналоговыми блоками	399
9.9.6. Пример дискретной системы	400
9.9.7. Применение примеров раздела Automotive	401
9.9.8. Ранняя модель автопилота летательного аппарата F14	401
9.9.9. Комбинированная модель автопилота F14	403
9.10. Моделирование ключа на мощном МДП-транзисторе ..	404
9.10.1. Построение субмодели мощного МДП-транзистора	404
9.10.2. Построение семейства ВАХ мощного МДП-транзистора	406
9.10.3. Моделирование передаточной характеристики	407
9.10.4. Динамическая модель мощного МДП-транзистора	408
9.10.5. Моделирование ключа на мощном МДП-транзисторе	411

Урок 10. Оптимизация отклика нелинейных систем	417
10.1. Пакеты оптимизации отклика нелинейных систем	418
10.1.1. Назначение пакетов	418
10.1.2. Состав блоков пакетов	418
10.1.3. Демонстрация работы блоков пакета NCD	419
10.2. Оптимизация нелинейных систем с помощью пакета NCD	420
10.2.1. Оптимизация коэффициента передачи И-регулятора ...	420
10.2.2. Меню окна блока NCD Output	425
10.2.3. Настройка параметров PID-регулятора	427
10.2.4. Настройка параметров комплексного регулятора	429
10.2.5. Настройка параметров ПИ-регулятора для многомерного объекта	432
10.2.6. Особенности решаемых оптимизационных задач	433
10.2.7. Функции и команды NCD Blockset	434
10.3. Новый пакет расширения Simulink Response Optimization	436
10.3.1. Назначение пакета расширения Simulink Response Optimization	436
10.3.2. Оптимизация системы с PID-контроллером	438
10.3.3. Оптимизация системы магнитной «левитации» стального шарика	439
10.3.4. Оптимизация системы энергетического преобразователя	441
10.3.5. Функции пакета расширения Simulink Response Optimization	445

Урок 11. Моделирование в электроэнергетике

449

11.1. Пакет расширения SimPowerSystems	450
11.1.1. Назначение пакета расширения SimPowerSystems	450

11.1.2. Состав библиотек SimPowerSystems Blockset	450
11.1.3. Параметры и единицы их измерения	451
11.2. Источники электрической энергии и их применение ...	452
11.2.1. Типы источников электрической энергии	452
11.2.2. Пример применения источника постоянного тока	453
11.2.3. Пример применения управляемого источника тока	453
11.2.4. Примеры применения источника переменного тока ...	454
11.2.5. Моделирование амплитудной модуляции	455
11.3. Основные элементы электротехнических устройств и систем	457
11.3.1. Библиотека компонентов Elements	457
11.3.2. Примеры моделирования RLC-цепей	459
11.3.3. Работа с блоком Powergui	461
11.3.4. Моделирование устройств с однофазными трансформаторами	463
11.3.5. Моделирование устройств с трехфазными трансформаторами	469
11.3.6. Выключатели и ограничители пиковых напряжений	470
11.3.7. Моделирование линий передачи	473
11.3.8. Моделирование линии передачи с компенсаторами	475
11.4. Моделирование систем и устройств энергетической электроники	480
11.4.1. Состав библиотеки энергетической электроники	480
11.4.2. Моделирование простых ключевых устройств	482
11.4.3. Моделирование устройств с мощными ключевыми полевыми транзисторами	485
11.4.4. Моделирование устройств с тиристорами	486
11.4.5. Моделирование устройств с запираемыми Gto модулями	488
11.4.6. Моделирование устройств с силовыми IGBT-модулями	489
11.4.7. Моделирование устройств с мостовыми модулями	493
11.5. Моделирование приводов электрических машин	494

11.5.1. Библиотека блоков электрических машин	494
11.5.2. Пример моделирования привода двигателя постоянного тока	495
11.5.3. Пример моделирования мощной синхронной машины ...	496
11.5.4. Пример моделирования привода асинхронного двигателя	497
11.6. Моделирование электрических преобразователей электроэнергии	498
11.6.1. Моделирование импульсного преобразователя с ключом на полевом транзисторе	498
11.6.2. Моделирование неуправляемых однофазных выпрямителей	500
11.6.3. Моделирование трехфазных выпрямителей	501
11.6.4. Моделирование однофазных инверторов	502
11.6.5. Моделирование трехфазных инверторов	503
11.6.6. Пример моделирования многоимпульсного GTO-преобразователя	506
11.6.7. Моделирование трехфазного инвертора для асинхронных двигателей	508
11.6.8. Моделирование динамической нагрузки и управляемого трехфазного источника	508
11.7. Новая библиотека Application Library в SimPowerSystems 4.*	510
11.7.1. Состав библиотеки Application Library	510
11.7.2. Блоки турбин ветровых электростанций	511
11.7.3. Блоки электрических устройств	512
11.7.4. Блоки машин постоянного тока	512
11.7.5. Блоки машин переменного тока	515
11.7.6. Блоки валов и редукторов	517
11.7.7. Блоки библиотеки гибких систем передачи на переменном токе	521
11.8. Другие библиотеки и примеры SimPowerSystems	522
11.8.1. Библиотека инструментов	522
11.8.2. Состав библиотеки Extra Library	524

11.8.3. Моделирование высоковольтных систем передачи электроэнергии на постоянном токе	526
--	-----

Урок 12. Моделирование механических систем и устройств

531

12.1. Начало работы с пакетом SimMechanics Blockset	532
12.1.1. Назначение пакета SimMechanics и его особенности ...	532
12.1.2. Библиотека пакета SimMechanics	533
12.1.3. Раздел библиотеки Bodies	536
12.1.4. Системы координат SimMechanics	536
12.2. Простой пример моделирования механического маятника	537
12.2.1. Диаграмма простого механизма – стержневого маятника	537
12.2.2. Пуск модели и наблюдение результатов моделирования	538
12.2.3. Специальные средства визуализации пакета SimMechanics	539
12.2.4. Установка параметров блоков диаграммы	541
12.3. Идеологии пакета SimMechanics	545
12.3.1. Наглядное представление механических устройств	545
12.3.2. Пример диаграммы конвейерного механизма	546
12.3.3. Контроль общих установок моделирования	548
12.3.4. Пуск модели механизма конвейера	549
12.4. Обзор основных блоков библиотеки SimMechanics	550
12.4.1. Блоки раздела Joints (Сочленения)	550
12.4.2. Блоки раздела Sensors & Actuators	553
12.4.3. Блоки раздела Constraints & Drives	555
12.4.4. Блоки раздела Force Elements	557
12.4.5. Блоки раздела Utilities	559
12.5. Обзор обычных демонстрационных примеров	561

12.5.1. Моделирование отскоков упругого шарика	561
12.5.2. Моделирование маятника с двумя стержнями	562
12.5.3. Моделирование четырехзвенного маятника	563
12.5.4. Моделирование простого винтового механизма	563
12.5.5. Моделирование полета тела (баллистическая задача)	564
12.5.6. Моделирование движения тела по заданной кривой ...	565
12.6. Моделирование механизмов с применением средств виртуальной реальности	566
12.6.1. Моделирование движений робота	566
12.6.2. Моделирование винтового планетарного механизма с виртуальной реальностью	568
12.6.3. Моделирование четырехцилиндрового двигателя	569
12.7. Пакет расширения по виртуальной реальности	570
12.7.1. Назначение пакета Virtual Reality Toolbox	570
12.7.2. Что такое виртуальная реальность в пакете VR?	573
12.7.3. Программирование перемещения автомобиля	576
12.7.4. Блоки виртуальной реальности для Simulink	583
12.7.5. Моделирование прыжков шара	584
12.7.6. Моделирование левитации стального шарика в магнитном поле	585
12.7.7. Пример моделирования движения автомобиля	586
12.7.8. Как создаются объекты виртуальной реальности	587
12.8. Основы моделирования аэрокосмических аппаратов	590
12.8.1. Назначение пакета Aerospace Blockset и состав его библиотеки	590
12.8.2. Координатная система пакета Aerospace Blockset	592
12.8.3. Блоки задания уравнений движения 6DoF и 3DoF	594
12.8.4. Блок системы турбовентиляторного двигателя	600
12.8.5. Блоки учета влияния среды раздела Environment	602
12.8.6. Блоки исполнительных механизмов – Actuators	604
12.8.7. Блоки регуляторов управления движением – GNC	605

12.8.8. Блоки свойства масс – Mass Properties	606
12.8.9. Блоки вычисления параметров полета – Flight Parameters	607
12.8.10. Блок аэродинамики – Aerodynamic	608
12.8.11. Блоки раздела утилит – Utility	609
12.8.12. Блоки анимации – Animation	610
12.9. Примеры применения пакета расширения Aerospace Blockset	613
12.9.1. Доступ к демонстрационным примерам	613
12.9.2. Простейшие примеры моделирования линейного силового привода	613
12.9.3. Пример анимации при шести степенях свободы полета ракеты	615
12.9.4. Пример анимации при трех степенях свободы полета ракеты	616
12.9.5. Моделирование полета самолета – «этажерки»	617
12.9.6. Моделирование полета космического корабля – челнока	618

Урок 13. Основы событийного моделирования

13.1. Пакет Stateflow	625
13.1.1. Понятие о событийном моделировании	626
13.1.2. Назначение пакета Stateflow	626
13.1.3. Доступ к средствам Stateflow	627
13.1.4. Понятие о SF-диаграмме	628
13.2. Основные объекты SF-диаграмм	629
13.2.1. Состояния и признаки памяти	629
13.2.2. Переходы и признаки альтернативы	629
13.2.3. События, процедуры и данные	630
13.2.4. Описание объектов	631
13.3. Пример построения модели с SF-диаграммой	633

13.3.1. Работа с редактором SF-диаграмм	633
13.3.2. Установка параметров SF-диаграммы с помощью обозревателя	635
13.3.3. Сохранение модели с SF-диаграммой	636
13.4. Запуск, отладка и форматирование SF-диаграмм	636
13.4.1. Установка параметров запуска	636
13.4.2. Запуск модели	637
13.4.3. Работа с отладчиком SF-диаграмм	638
13.4.4. Средства отладки SF-диаграмм	640
13.4.5. Поиск объектов SF-диаграмм	642
13.4.6. Выбор стиля SF-диаграмм	643
13.4.7. Установка размера символов	643
13.5. Особенности версий пакета расширения Stateflow	644
13.5.1. Новый редактор SF-диаграмм в Stateflow 5.*	644
13.5.2. Несколько простых примеров применения Stateflow 5.*	644
13.5.3. Пакет расширения Stateflow 6.*	645
13.6. Примеры применения пакета Stateflow 6.3	646
13.6.1. Работа с демонстрационными примерами	646
13.6.2. Пример реализации рекурсивной функции вычисления факториала	649
13.6.3. Пример векторизации	650
13.6.4. Пример организации цикла	650
13.6.5. Пример работы с Fixed Point средствами	651
13.6.6. Пример работы с рабочим пространством MATLAB	652
13.6.7. Построение фрактала Мандельброта	653
13.6.8. Моделирование скользящего с трением бруска	654
13.6.9. Моделирование системы трансмиссии автомобиля	655
13.6.10. Моделирование отказоустойчивой системы контроля топлива	656

Урок 14. Моделирование устройств обработки сигналов и изображений	665
14.1. Пакет расширения Signal Processing Blockset 6.5	666
14.1.1. Назначение пакета расширения Signal Processing Blockset 6.5	666
14.1.2. Состав блоков библиотеки пакета Signal Processing Blockset 6.5	667
14.1.3. Работа с источниками и получателями сигналов	669
14.1.4. Работа с блоками математических операций	670
14.1.5. Типовые матричные операции	671
14.1.6. Операции с полиномами	673
14.1.7. Квантование сигналов	674
14.1.8. Управление сигналами	675
14.1.9. Организация буфера, очереди и стека	675
14.1.10. Организация сдвигового регистра и линии задержки	680
14.1.11. Подраздел Signal Attributes	681
14.1.12. Переключатели и счетчики	681
14.1.13. Обработка сигналов (раздел Signal Operations)	684
14.1.14. Раздел оценки блоков – DSP Estimation	685
14.1.15. Преобразования сигналов (раздел Transforms)	687
14.1.16. Статистическая обработка данных (раздел DSP Statistics)	689
14.1.17. Фильтрация сигналов (раздел Filtering)	692
14.2. Примеры моделирования систем на основе пакета SPB	692
14.2.1. Модель адаптивного фильтра RLS	692
14.2.2. Модель адаптивного фильтра Калмана	692
14.2.3. Модель стереоэкспандера	693
14.2.4. Модель анализатора спектра с оконным БПФ	693
14.2.5. Реконструкция сигнала после вейвлет-фильтрации	696
14.2.6. Реконструкция сигнала после вейвлет-фильтрации	697
14.2.7. Вейвлет-очистка сигнала от шума	698

14.2.8. Однополосная модуляция (SSB)	699
14.2.9. Адаптивная дельта-импульсная кодовая модуляция	699
14.3. Пакет расширения RF Blockset	700
14.3.1. Назначение пакетов расширения RF Toolbox и Blockset	700
14.3.2. Системы параметров для радиочастотных объектов ...	702
14.3.3. Библиотека блоков пакета RF Blockset	703
14.3.4. Работа с математическими блоками	704
14.3.5. Применение блоков портов ввода/ вывода	707
14.3.6. Визуализация графических характеристик блоков	708
14.4. Примеры применения пакета RF Blockset	711
14.4.1. Сравнение реализаций усилителей	711
14.4.2. Моделирование фильтров на линиях передачи	713
14.4.3. Моделирование многокаскадных радиочастотных систем	715
14.4.4. Примеры совместного применения пакетов RF и Communication Blockset	716
14.5. Пакет Communications Blockset	718
14.5.1. Назначение пакетов Communications Blockset и Communications Toolbox	718
14.5.2. Основы работы	719
14.5.3. Доступ к библиотеке пакета и ее разделам	720
14.5.4. Источники и получатели коммуникационных сигналов	721
14.5.5. Моделирование кодирования и декодирования	723
14.5.6. Моделирование модуляторов и демодуляторов	725
14.5.7. Библиотеки каналов	727
14.5.8. Библиотека модулей синхронизации	727
14.5.9. Применение блоков детектирования ошибок и коррекции	732
14.5.10. Блоки фильтров и эквалайзеров	733
14.5.11. Обзор других разделов библиотеки Communication Blockset	738

14.6. Знакомство с Video and Image Processing Blockset	741
14.6.1. Инсталляция и назначение Video and Image Processing Blockset	741
14.6.2. Доступ к библиотеке блоков пакета	742
14.6.3. Поддерживаемые типы изображений и данных	743
14.6.4. Первый пример – просмотр видеофильма	743
14.6.5. Блоки источников и получателей изображений	744
14.6.6. Раздел Analysis & Enhancement	745
14.6.7. Раздел Filtering	746
14.6.8. Раздел геометрических преобразований Geometric Transformations	746
14.6.9. Блоки морфологических операций – Morphological Operations	747
14.6.10. Раздел Conversions	748
14.6.11. Раздел Transform	748
14.6.12. Блоки статистической обработки изображений – Statistics	749
14.6.13. Блоки раздела Text & Graphics	749
14.6.14. Блоки утилит – Utilities	750
14.7. Основные операции с изображениями и видеофайлами	750
14.7.1. Импорт и экспорт мультимедийных файлов	750
14.7.2. Удаление шума на изображении	751
14.7.3. Удаление периодического шума видеоизображений ...	751
14.7.4. Создание панорамного изображения	752
14.7.5. Построение динамической картинке внутри другой динамической картинке	753
14.7.6. Вращение изображения	755
14.7.7. Морфологическое открытие и пересчет объектов изображения	756
14.7.8. Улучшение четкости выделенной части изображения	757
14.7.9. Нахождение и выделение кромок у объектов изображений	757

14.7.10. Стабилизация перемещаемого изображения	758
14.7.11. Прослеживание движущихся автомобилей	760
14.7.12. Сегментация по цвету и ячеек	760
14.7.13. Сжатие изображения	762
14.7.14. Проекция изображения на вращающийся кубик	765
Список литературы	766
Предметный указатель	770

Введение

В наши дни компьютерная математика получила должную известность и находится на этапе быстрого развития [1]. Начав свой путь с применения программируемых микрокалькуляторов и расчетов на персональных ЭВМ (компьютерах), она породила целый ряд своих специальных программных средств – систем компьютерной математики (СКМ) и пакетов их расширения.

Среди СКМ, в первую очередь ориентированных на численные расчеты, особо выделяется матричная математическая система MATLAB – самая эффективная среди систем для численных вычислений. Система фактически стала мировым стандартом в области современного математического и научно-технического программного обеспечения. В разработке MATLAB и пакетов расширения этой системы принимают участие крупные научные школы мира, многие ведущие университеты и иные организации.

Эффективность MATLAB обусловлена прежде всего ее ориентацией на матричные вычисления [2, 3] с программной эмуляцией параллельных вычислений и упрощенными средствами задания циклов. В MATLAB удачно реализованы средства работы с многомерными массивами, большими и разреженными матрицами и многими типами данных. Система прошла многолетний путь развития от узко специализированного матричного программного модуля, используемого только на больших ЭВМ, до универсальной интегрированной СКМ, ориентированной на массовые персональные компьютеры класса IBM PC, AT и Macintosh и рабочие станции UNIX. MATLAB имеет мощные средства диалога, графики и *комплексной визуализации* вычислений, в том числе с привлечением средств дескрипторной графики и виртуальной реальности.

Система MATLAB предлагается разработчиками (корпорация The MathWorks, Inc.) как лидирующий на рынке, в первую очередь на предприятиях военно-промышленного комплекса, в энергетике, в аэрокосмической отрасли и в автомобилестроении, язык программирования *высокого уровня* для технических вычислений, расширяемый большим числом пакетов прикладных программ – *расширений*. В новых реализациях их число составляет сотни, причем свыше 80 пакетов расширений фирмы MathWorks входят в полную поставку новейшей системы MATLAB R2007b. Самым известным из них стало расширение Simulink, обеспечивающее блочное имитационное моделирование различных систем и устройств с применением современной технологии визуально-ориентированного программирования.

Структура комплекса MATLAB + Simulink, помимо основы – системы MATLAB и главного расширения Simulink, содержит обширные группы пакетов расширения (рис. 0.1). Это инструментальные ящики Toolboxes с большим числом пакетов расширения, приближающимся к сотне, и группа пакетов расширения Blocksets, увеличивающая возможности системы визуально-ориентированного блочного имитационного моделирования динамических систем Simulink.

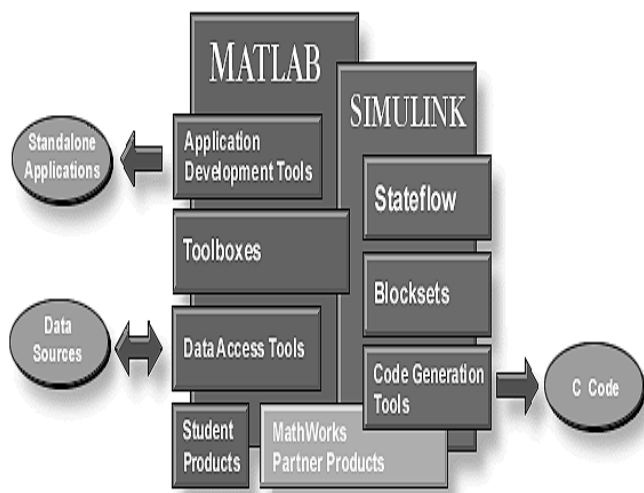


Рис. 0.1. Структура системы MATLAB + Simulink

В России первой книгой по системе MATLAB стала книга [4], выпущенная еще в 1993 г. В дальнейшем было опубликовано множество книг по различным версиям этой мощной системы [5–49]. Так, только на Web-узле корпорации The MathWorks, Inc., разработавшей эту систему, указано уже более 1000 книг. Среди них есть и книги автора (рис. 0.2), вошедшие в программу поддержки подготовки книг корпорации The The MathWorks, Inc. (далее просто The MathWorks).

К сожалению, в России мало публикаций по новейшим версиям системы MATLAB и особенно по ее расширению Simulink. Лишь после 1997 г. появился ряд книг по системам MATLAB и отдельным пакетам расширения этой системы [4–43]. Из них следует особо отметить трехтомник автора [13–15] по версиям MATLAB 6.* и пятитомник по MATLAB 6.5 и MATLAB 7 [16–20]. Предшествующие Simulink 6.* версии пакета Simulink описаны в книгах [6, 9, 13, 16, 32–34], из которых только две [9, 33] посвящены отдельно расширению Simulink. По новым версиям Simulink 6.* Simulink 7 литература у нас отсутствует.

Увы, но объем книг по системе MATLAB и ее пакетам расширения так же непрерывно растет, как и их стоимость. Достаточно отметить, что последние книги только по системе MATLAB учебного характера имеют объем более 750 [29] и даже свыше 1100 [28] страниц. Пять последних томов автора по системе MATLAB с пакетами расширения насчитывают уже более 2800 страниц [16–20].

Фирменная документация по системе (англоязычная) представлена многими десятками книг, например [44–49]. Она настолько разрослась, что разработчики MATLAB были вынуждены прекратить поставки ее в виде PDF-файлов на отдельном CD-ROM или DVD и ныне разместили ее на своем интернет-сайте. Однако из-за большого объема файлов документации скачать их весьма проблематично даже для тех наших пользователей, которые имеют доступ в обычный

Dutch	Mathematical Packages of Expansion for MATLAB: Special Handbook Dyakonov / Kruglov Piter, 2001
Finnish	
French	
German	MATLAB 5 with Packages of Expansion Dyakonov / Abramenkova / Kruglov Knowledge, 2001
Greek	
Hungarian	
Italian	MATLAB 6.5 SP1/7.0 and Simulink 5/6: Bases of Application Dyakonov Solon-R, 2005
Japanese	
Korean	
Norwegian	MATLAB 6.5 SP1/7.0 and Simulink 5/6: Mathematics and Modeling Dyakonov Solon-R, 2005
Polish	
Portuguese	
Romanian	MATLAB 6.5 SP1/7.0 and Simulink 5/6: Signal Processing and Filter Design Dyakonov Solon-R, 2005
Russian	
Serbian	
Slovak	MATLAB 6.5 SP1/7/7 SP1 and Simulink 5/6: Working with Images and Video Dyakonov Solon-R, 2005
Spanish	
Swedish	
Turkish	MATLAB 6.5SP1/7/7 SP1/7 SP2 and Simulink 5/6: Artificial Intelligence and Bioinformatic Instruments Dyakonov / Kruglov SOLO-Press, 2006
Ukrainian	
Vietnamese	
Join Book Program	
	MATLAB 6/6.1/6.5 and Simulink 4/5 in Mathematics and Simulation Dyakonov Solon-R, 2003
	MATLAB 6/6.1/6.5 and Simulink 4/5: Principles of Use Dyakonov Solon-R, 2002
	MATLAB 6: An Educational Course

Рис. 0.2. Книги автора по системе MATLAB и пакетам ее расширения на интернет-сайте корпорации The MathWorks

Интернет. Кроме того, информация в PDF-файлах англоязычная и огромная по размеру.

Все это делает книги по MATLAB и Simulink доступными лишь для малой части наших инженеров, научных работников и преподавателей вузов и университетов. Достаточно отметить, что стоимость всего одной крупной книги по системе MATLAB составляет примерно трехмесячную выплату на приобретение литературы, предусмотренную в государственных вузах и университетах Российской Федерации для их преподавателей.

В связи с этим актуальной стала подготовка серии относительно небольших учебных курсов и самоучителей по системе MATLAB и ее приложениям. Однако в связи с отсутствием в программах большинства вузов и университетов учебных курсов по системе MATLAB более целесообразной является подготовка самоучителей, ориентированных на широкую читательскую аудиторию: студентов, аспирантов и преподавателей вузов и университетов, инженеров и научных работников. Все они вынуждены осваивать MATLAB и пакеты расширения этой системы самостоятельно.

Самоучитель по базовой системе MATLAB уже был предложен читателям. В данном, втором самоучителе впервые описаны новейшие реализации пакета

расширения Simulink 5/6/7 систем MATLAB 6.5 (R13)/7(R14)/R2006/R2006a/R2006b/R2007a/R2007b.

Simulink – главный пакет расширения системы MATLAB, реализующий имитационное блочное визуально-ориентированное моделирование систем и устройств как самого общего, так и конкретного назначения. В книге описаны и современные реализации наиболее важных пакетов расширения Simulink инструментального ящика Blockset: Simulink Response Optimizarion для моделирования и оптимизации отклика нелинейных систем, SimPowerSystems для моделирования и проектирования энергетических систем и устройств, SimMechanics для моделирования и проектирования механизмов и механических систем, Signal Processing для моделирования систем обработки сигналов, Telecommunication для моделирования систем телекоммуникаций, Video and Image Processing для моделирования систем, работающих с видеопотоками и видеоизображениями, и др. Описаны средства виртуальной реальности MATLAB.

Отличительными особенностями данной книги являются:

- достаточно полное теоретическое введение по основам математического моделирования различных систем и устройств;
- особое внимание к технике наглядной графической визуализации математического моделирования, в том числе на основе применения средств виртуальной реальности пакета Virtual Reality Toolbox;
- ориентация на современное визуально-ориентированное блочное моделирование, реализованное в новейших версиях пакета расширения системы MATLAB + Simulink;
- ориентация на читателей, желающих самостоятельно освоить технику визуально-ориентированного математического блочного моделирования на основе базовой системы MATLAB и ее расширений для такого моделирования – прежде всего Simulink 6/7;
- компактность книги при сохранении достаточной полноты изложения материала и справочных данных;
- описание новейших реализаций пакета расширений Simulink 6/7 для систем MATLAB R2006/R2006a/R2006b/R2007a/ R2007b;
- выделение (прямо скажем, не очень больших и глубоких) отличий между реализациями Simulink 5/6/7;
- более систематизированное и глубокое изложение материала, в том числе относящегося к библиотекам блоков пакета расширения Simulink и других пакетов расширения;
- значительно более подробное, чем в прежних книгах автора, и собранное воедино описание новейших реализаций пакетов расширения Simulink: Nonlinear Control Design, SimPowerSystems, SimMechanics и Aerospace;
- доступность основного материала пользователям версий MATLAB Simulink 5.*;
- разделение материала книги на отдельные уроки, каждый из которых, в зависимости от глубины изучения материала, может потребовать от 4 до 6 академических часов.

Внедрение системы MATLAB + Simulink в учебный процесс вузов России и стран СНГ находится в начальной стадии. В большинстве наших вузов и университетов пока нет отдельного курса по этой системе, но спецкурсы по ней уже появились. Довольно часто изучение MATLAB выполняется в рамках курсов по численным методам вычислений и математическому моделированию. В связи с этим особенно важным представляется издание самоучителей по системе MATLAB и пакетам ее расширения, часто охватывающим целые направления науки и техники.

Данная книга может служить не только самоучителем по расширению Simulink системы MATLAB и ряду относящихся к нему других расширений, но и достаточно полным учебным курсом, учебным пособием и даже справочником по Simulink. Книга предполагает знакомство пользователя с базовой системой MATLAB, например в пределах самоучителя по этой системе (первой книги данной серии). Однако в целом книга носит вполне самостоятельный характер.

Краткое введение в математическое моделирование

1.1. Основные понятия моделирования	38
1.2. Источники воздействий и сигналы	40
1.3. Технология моделирования	42
1.4. Моделирование линейных динамических объектов и систем	46
1.5. Моделирование нелинейных объектов и систем	53
1.6. Моделирование дискретных систем	54

Математическое моделирование основано на достижениях математики – как классической, так и новейшей компьютерной, ориентированной на выполнение вычислений с помощью современных компьютеров [1–40, 66–69]. Чтобы работать с такой мощной системой математического моделирования, как Simulink, нужен определенный минимум теоретических знаний по математике, численным методам [50–64] и математическому моделированию [71–81]. Он и содержится в данном уроке.

1.1. Основные понятия моделирования

1.1.1. Значение математического моделирования

Моделирование можно рассматривать как замещение исследуемого объекта (оригинала) его условным образом, описанием или другим объектом, именуемым *моделью* и обеспечивающим адекватное с оригиналом поведение в рамках некоторых допущений и приемлемых погрешностей. Моделирование обычно выполняется с целью познания свойств оригинала, путем исследования его модели, а не самого объекта. Разумеется, моделирование оправдано в том случае, когда оно проще создания самого оригинала или когда последний по каким-то причинам лучше вообще не создавать. Вопросам моделирования посвящена обширная литература, отдельно отметим работы [67–69, 71–81].

Исключительно велика роль моделирования в ядерной физике и энергетике. Достаточно сказать, что замена натуральных ядерных испытаний моделированием не только экономит огромные средства, но и благоприятно сказывается на экологии планеты Земля. А такое явление, как «ядерная зима», вообще может исследоваться только на моделях, поскольку произойди оно на самом деле, это означало бы уничтожение жизни на Земле. Запрет на испытания ядерного оружия стал возможен также благодаря самым изысканным средствам моделирования ядерных и термоядерных процессов. Трудно переоценить роль моделирования в космонавтике и авиации, в предсказании погоды, в разведке природных ресурсов и т. д.

Однако не только такие показательные примеры демонстрируют роль математического (и компьютерного) моделирования. На самом деле моделирование даже самых простых и широко распространенных устройств, например работы сливного бачка в туалете или электрического утюга, ведет к огромной экономии средств и улучшению качества массовых изделий. Чем сложнее проектируемый объект, тем, как правило, важнее роль моделирования в его изучении и создании. Самое широкое применение моделирование находит в механике и физике, электротехнике, радиотехнике и электронике, в технике обработки сигналов и коммуникаций. В свою очередь, успехи в этом направлении способствуют созданию аппаратных и программных средств математического моделирования.

Трудно переоценить роль моделирования в образовании, где нередко реальные дорогие лабораторные работы приходится заменять компьютерным модели-

рованием. Но, пожалуй, главное заключается в том, что математическое моделирование позволяет понять физическую и математическую сущности моделируемых явлений и обосновать оптимальные подходы к проектированию самых различных изделий.

Реальная польза от моделирования может быть получена при выполнении двух главных условий:

- модель должна быть адекватной оригиналу в том смысле, что должна с достаточной точностью отображать интересующие исследователя характеристики оригинала;
- модель должна устранять проблемы, связанные с физическим измерением каких-то сигналов или характеристик оригинала.

1.1.2. Основные виды моделей

В зависимости от способа реализации все модели можно разделить на два обширных класса.

Физические модели. Они предполагают, как правило, реальное воплощение тех физических свойств оригинала, которые интересуют исследователя. Упрощенные физические модели, нередко уменьшенных габаритов, называются *макетами*. Поэтому физическое моделирование часто именуют *макетированием*.

Математические модели. Они представляют собой формализованные описания объекта или системы с помощью некоторого абстрактного языка, например в виде совокупности математических соотношений или схемы алгоритма. Различают следующие виды математического моделирования: вербальные (словесные), графические, табличные, аналитические и алгоритмические. Нередко математические модели оказываются пригодными для описания множества систем и явлений в самых различных областях науки, техники и экономики.

Иногда математическая модель описывается уравнениями, которые явно вытекают из рассмотрения физической сущности моделируемого явления или системы. Примером может служить экспоненциальное выражение для вольтамперной характеристики полупроводникового диода (теория предсказывает именно такой ее вид). Однако чаще описание моделируемых объектов и систем носит чисто формальный характер и базируется на том, что многие явления порой самой различной природы описываются уравнениями (алгебраическими, дифференциальными и иными) одного и того же вида. В этом случае говорят о *формальных* моделях. Например, формальной моделью того же диода служит модель в виде отрезков двух прямых: один задает сопротивление диода в открытом, а другой – в закрытом состоянии.

Если математическая модель служит для имитации поведения какого-либо реального объекта во времени, то она называется *имитационной моделью*. В англоязычной литературе это соответствует термину Simulation Modeling (в смысле симуляции поведения). К уточнению понятия имитационной модели мы еще вернемся. Пока лишь отметим, что именно имитационное моделирование является основным для пакета расширения Simulink системы MATLAB, что прямо видно из названия этого пакета.

Кроме того, явления, системы и их модели могут быть нестационарными и стационарными. *Нестационарные модели* характеризуются зависимостью их параметров от времени. У *стационарных моделей* такой зависимости нет. Естественно, что моделирование нестационарных явлений гораздо сложнее, чем стационарных.

1.1.3. Основные свойства моделей

Модели обладают рядом свойств, от которых зависит успех их применения в практике моделирования. Отметим лишь некоторые из них, наиболее важные.

- *Адекватность* – это степень соответствия модели исследуемому реальному объекту. Она никогда не может быть полной. На практике модель считают адекватной, если она с удовлетворительной точностью позволяет достичь целей исследования.
- *Простота (сложность)* также является одной из характеристик модели. Чем большее количество свойств объекта описывает модель, тем более сложной она оказывается. Не всегда чем сложнее модель, тем выше ее адекватность. Надо стремиться найти наиболее простую модель, позволяющую достичь требуемых результатов изучения.
- *Потенциальность (предсказательность)* – способность модели дать новые знания об исследуемом объекте, спрогнозировать его поведение или свойства. На основе изучения математических моделей, описывающих движение планет Солнечной системы с учетом закона всемирного тяготения, теоретически были предсказаны существование и орбиты планет Нептун и Плутон.

Есть и другие свойства моделей, но они не столь важны, как отмеченные.

1.1.4. Цели моделирования

Существует множество конкретных целей моделирования. Отметим две цели обобщающего значения:

- изучение механизма явлений (познавательная цель);
- управление объектами и системами с целью выработки по модели оптимальных управляемых воздействий и характеристик системы.

В обоих случаях модель создается для определения и прогноза интересующих нас характеристик или сигналов объекта.

1.2. Источники воздействий и сигналы

1.2.1. Понятие о сигналах

Чаще всего целью моделирования является изучение реакции системы или устройства на некоторые воздействия, в качестве которых нередко используются *сигналы*. Иногда их называют стандартными, или *тестовыми, сигналами*.

Слово «сигнал» происходит от латинского слова «сигнум» – знак. Итак, сигналы – это знаки (символы), о назначении которых мы заранее условились. Такова информационная трактовка сигнала. В физико-математическом представлении под сигналом можно подразумевать функциональную зависимость некоторого параметра (например, напряжения, тока, усилия, расстояния и т. д.) от другого параметра (например, времени, интенсивности света и т. д.). Однако отождествлять сигнал просто с функцией не совсем верно. Сигналы правильно рассматривать как носители информации той или иной физической природы. Это могут быть напряжения и токи (электрические сигналы), колебания воздуха при звуках (звуковые сигналы), электромагнитные волны и свет (оптические сигналы) и т. д.

Сигналы можно рассматривать также как форму, в которую облечена передаваемая, хранимая или перерабатываемая информация. Сигналы могут быть преобразованы из одного вида в другой вид (например, электрические сигналы можно преобразовать в оптические, и наоборот) при сохранении имеющейся в сигнале информации. Сигналы могут быть *стационарными*, если их параметры неизменны в ходе моделирования, или *нестационарными*, если они меняются – чаще всего во времени.

В Simulink принято говорить о воздействиях любой физической природы. В пакете есть обширный набор источников воздействий (сигналов) и средств для простого и быстрого изменения их параметров.

1.2.2. Синусоидальный сигнал

С помощью источников воздействия можно оценивать поведение различных устройств и систем. К примеру, важнейшие характеристики линейных усилителей рассматриваются как его реакция на гармонический (синусоидальный) сигнал:

$$u(t) = U_m \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi) = U_m \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t + \varphi),$$

где U_m – амплитуда сигнала, $\omega = 2\pi f$ – круговая частота (в рад/с), f – частота (в герцах), φ – фаза (в долях периода $T = 1/f$ или градусах). Синусоидальный сигнал является периодической функцией времени t , что соответствует равенству $u(t) = u(t \pm k \cdot T)$, где k – целое число. Синусоидальный сигнал стационарен – это означает, что его параметры (амплитуда, частота и фаза) не меняются во времени. Такой сигнал определен в интервале времени от $-\infty$ до $+\infty$, то есть по существу он является теоретической абстракцией (достаточно отметить, что энергия подобного сигнала равна бесконечности). Естественно, что на практике сигнал такого вида рассматривается в конечном интервале времени.

1.2.3. Дельта-функция Дирака и функция Хевисайда

Целью моделирования импульсных систем и устройств часто является оценка их влияния на импульсные сигналы. В теоретическом аспекте особый интерес представляют два импульсных сигнала – единичный импульс и единичный перепад.