

ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ моделирование в SIMULINK

- *Введение в Simulink*
- *Технология моделирования в Simulink*
- *Дискретные и цифровые сигналы*
- *Системы цифровой фильтрации*
- *Системы цифровой фильтрации с фиксированной точкой*
- *Средства вычисления ДПФ на основе БПФ*
- *Многоскоростные системы*

УДК 681.3.06
ББК 32.973.26-018.2
С60

Солонина А. И.

С60 Цифровая обработка сигналов. Моделирование в Simulink. — СПб.: БХВ-Петербург, 2012. — 432 с.: ил. — (Учебное пособие)
ISBN 978-5-9775-0686-1

Учебное пособие посвящено технологии создания Simulink-моделей и моделирования динамических систем цифровой обработки сигналов (ЦОС) с использованием базовых методов и алгоритмов ЦОС. Для облегчения работы начинающих пользователей даны основы моделирования в Simulink. Подробно описана технология создания Simulink-моделей дискретных и цифровых сигналов, специфика их обработки и анализа в процессе моделирования. Рассмотрены математические модели и Simulink-модели линейных дискретных систем, систем цифровой фильтрации с КИХ- и БИХ-фильтрами различных структур, в том числе с фиксированной точкой, многоскоростных систем с полифазными структурами, а также средства вычисления дискретного преобразования Фурье на основе быстрого преобразования Фурье.

Для студентов и преподавателей колледжей и вузов, инженеров-конструкторов

Рецензенты:

Е. Б. Соловьева, д-р техн. наук, завкафедрой теоретических основ электротехники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ»;
В. А. Варгаузин, канд. техн. наук, доцент кафедры радиотехники и телекоммуникаций Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

УДК 681.3.06
ББК 32.973.26-018.2

Группа подготовки издания:

Главный редактор	<i>Екатерина Кондукова</i>
Зам. главного редактора	<i>Евгений Рыбаков</i>
Зав. редакцией	<i>Григорий Добин</i>
Редактор	<i>Екатерина Капалыгина</i>
Компьютерная верстка	<i>Татьяны Олоновой</i>
Корректор	<i>Наталья Першакова</i>
Дизайн серии	<i>Инны Тачиной</i>
Оформление обложки	<i>Марины Дамбиевой</i>
Зав. производством	<i>Николай Тверских</i>

Подписано в печать 14.03.2012.
Формат 70×100²/₁₆. Печать офсетная. Усл. печ. л. 34,83.
Тираж 1200 экз. Заказ №
"БХВ-Петербург", 190005, Санкт-Петербург, Измайловский пр., 29.
Отпечатано с готовых диапозитивов
в ГУП "Типография "Наука"
199034, Санкт-Петербург, 9 линия, 12.

Оглавление

Предисловие.....	11
Часть I. Знакомство с Simulink	13
Глава 1. Simulink как подсистема MATLAB	15
1.1. Средства моделирования в MATLAB. Специфика Simulink	15
1.2. Принятые обозначения	16
1.3. Установка и запуск Simulink.....	17
1.4. Библиотека Simulink	19
1.5. Система помощи MATLAB	23
1.5.1. Команда <i>help</i>	24
1.5.2. Пункт меню <i>Help</i> окна <i>MATLAB</i>	24
1.5.3. Пункт меню <i>Help</i> окна <i>Simulink Library Browser</i>	26
Глава 2. Технология создания S-модели системы	28
2.1. Математическая модель и S-модель системы	28
2.2. Основные этапы создания S-модели системы.....	31
2.3. Редактирование S-модели системы.....	35
2.3.1. Операции с компонентами S-модели системы	35
2.3.2. Операции по оформлению S-моделей системы.....	38
2.4. Исследование S-модели.....	41
Глава 3. Технология моделирования системы.....	43
3.1. Настройка S-модели системы	43
3.2. Настройка обмена данными S-модели системы с рабочим пространством памяти <i>Workspace</i>	50
3.3. Настройка диагностики моделирования.....	54
3.4. Моделирование системы — запуск, пауза и останов	56
3.5. Примеры моделирования простейших систем	56
Глава 4. Сигналы.....	58
4.1. S-модели сигналов	58
4.2. Параметры блоков.....	59
4.2.1. Блок <i>Band-Limited White Noise</i>	60

4.2.2. Блок Chirp Signal	62
4.2.3. Блок Clock	63
4.2.4. Блок Constant	64
4.2.5. Блок Counter Free-Running.....	68
4.2.6. Блок Counter Limited	69
4.2.7. Блок Digital Clock	70
4.2.8. Блок From File	70
4.2.9. Блок From Workspace	72
4.2.10. Блок Ground	76
4.2.11. Блок In	76
4.2.12. Блок Pulse Generator	78
4.2.13. Блок Ramp	79
4.2.14. Блок Random Number	80
4.2.15. Блок Repeating Sequence	80
4.2.16. Блок Repeating Sequence Interpolated.....	81
4.2.17. Блок Repeating Sequence Stair.....	82
4.2.18. Блок Signal Generator	83
4.2.19. Блок Sine Wave	83
4.2.20. Блок Step.....	85
4.2.21. Блок Uniform Random Number	86
4.3. Виртуальные и неvirtуальные блоки.....	86
Глава 5. Средства анализа сигналов.....	88
5.1. S-модели средств анализа сигналов	88
5.2. Параметры блоков.....	89
5.2.1. Блок Display	89
5.2.2. Блок Out.....	90
5.2.3. Блок Scope	91
5.2.4. Блок Stop Simulation.....	93
5.2.5. Блок Floating Scope.....	94
5.2.6. Блок Terminator.....	94
5.2.7. Блок To File	94
5.2.8. Блок To Workspace	95
5.2.9. Блок XY Graph.....	98
Глава 6. Математические преобразования.....	99
6.1. Средства библиотеки блоков Simulink	99
6.1.1. Арифметические операции.....	99
6.1.1.1. Блок Add	100
6.1.1.2. Блок Bias	103
6.1.1.3. Блок Divide	103
6.1.1.4. Блок Dot Product.....	105
6.1.1.5. Блок Gain	105

6.1.1.6. Блок Product.....	106
6.1.1.7. Блок Product of Elements.....	108
6.1.1.8. Блок Slider Gain.....	108
6.1.1.9. Блок Subtract.....	108
6.1.1.10. Блок Sum.....	108
6.1.1.11. Блок Sum of Elements.....	108
6.1.1.12. Блок Unary Minus.....	108
6.1.2. Элементарные математические функции	109
6.1.2.1. Блок Abs.....	109
6.1.2.2. Блок Math Function.....	110
6.1.2.3. Блок Sign.....	111
6.1.2.4. Блок Trigonometric Function.....	111
6.1.3. Операции с комплексными числами	111
6.1.3.1. Блок Complex to Magnitude-Angle.....	112
6.1.3.2. Блок Complex to Real-Imag.....	112
6.1.3.3. Блок Magnitude-Angle to Complex.....	113
6.1.3.4. Блок Real-Imag to Complex.....	113
6.1.4. Округление с помощью блока Rounding Function.....	114
6.1.5. Операции с матрицами и векторами.....	115
6.1.5.1. Блок Matrix Concatenate.....	115
6.1.5.2. Блок MinMax.....	116
6.1.5.3. Блок Reshape.....	116
6.1.5.4. Блок Vector Concatenate.....	117
6.1.6. Вычисление корней уравнения и значений многочлена	117
6.1.6.1. Блок Algebraic Constraint.....	118
6.1.6.2. Блок Polynomial.....	118
6.1.7. Операции отношения и логические операции.....	119
6.1.7.1. Блок Compare To Constant.....	119
6.1.7.2. Блок Compare To Zero.....	120
6.1.7.3. Блок Relational Operator.....	120
6.1.7.4. Блок Logic Operator.....	121
6.1.8. Побитовые операции.....	122
6.1.8.1. Блок Bit Clear.....	122
6.1.8.2. Блок Bit Set.....	123
6.1.8.3. Блок Bitwise Operator.....	123
6.1.8.4. Блок Shift Arithmetic.....	124
6.1.9. Объекты MATLAB.....	124
6.1.9.1. Блок Fcn.....	125
6.1.9.2. Блок MATLAB Fcn.....	126
6.1.9.3. Блок Embedded MATLAB Function.....	127
6.1.10. Основные характеристики матрицы.....	128
6.2. Средства библиотеки блоков Signal Processing Blockset.....	128
6.2.1. Специальные математические операции с матрицами.....	128
6.2.1.1. Блок Complex Exponential.....	129
6.2.1.2. Блок Cumulative Product.....	129
6.2.1.3. Блок Cumulative Sum.....	131
6.2.1.4. Блок dB Conversion.....	131

6.2.1.5. Блок Difference	132
6.2.1.6. Блок Normalization	133
6.2.2. Типовые матрицы	135
6.2.2.1. Блок Create Diagonal Matrix	135
6.2.2.2. Блок Extract Diagonal	136
6.2.2.3. Блок Extract Triangular Matrix	136
6.2.2.4. Блок Identity Matrix	136
6.2.2.5. Блок Toeplitz	137
6.2.3. Преобразование матриц	138
6.2.3.1. Блок Matrix Concatenate	138
6.2.3.2. Блок Overwrite Values	138
6.2.3.3. Блок Permute Matrix	140
6.2.3.4. Блок Submatrix	141
6.2.4. Операции с матрицами в задачах линейной алгебры	141
6.2.4.1. Блок Matrix Multiply	142
6.2.4.2. Блок Matrix Product	142
6.2.4.3. Блок Matrix Square	142
6.2.4.4. Блок Matrix Sum	143
6.2.4.5. Транспонирование и эрмитово сопряжение матрицы	143
6.2.5. Обращение матрицы	144
6.2.5.1. Блок LU Inverse	144
6.2.5.2. Блок LDL Inverse	145
6.2.5.3. Блок Cholesky Inverse	146
6.2.6. Разложение матрицы	146
6.2.6.1. Блок LU Factorization	147
6.2.6.2. Блок QR Factorization	148
6.2.6.3. Блок Cholesky Factorization	148
6.2.7. Решение систем линейных алгебраических уравнений	149
6.2.7.1. Блок LU Solver	150
6.2.7.2. Блок QR Solver	150
6.2.7.3. Блок Cholesky Solver	151
6.2.8. Операции с матрицами в задачах математической статистики	151
6.2.8.1. Блок Autocorrelation	152
6.2.8.2. Блок Correlation	153
6.2.8.3. Блок Maximum	154
6.2.8.4. Блок Mean	156
6.2.8.5. Блок Minimum	157
6.2.8.6. Блок RMS	157
6.2.8.7. Блок Sort	158
6.2.8.8. Блок Standard Deviation	159
6.2.8.9. Блок Variance	160

Глава 7. Средства управления сигналами..... 160

7.1. S-модели средств управления маршрутом сигнала	160
7.1.1. Блок Mus	161
7.1.2. Блок Demux	162

7.1.3. Блок Bus Creator	165
7.1.4. Блок Bus Selector	166
7.1.5. Блок Goto	167
7.1.6. Блок From	169
7.1.7. Блок Manual Switch	169
7.1.8. Блок Switch	169
7.1.9. Блок Selector	170
7.1.10. Блок Merge	173
7.2. S-модели средств управления атрибутами сигнала	176
7.2.1. Блок Bus to Vector	176
7.2.2. Блок Data Type Conversion	177
7.2.3. Блок Data Type Conversion Inherited	180
7.2.4. Блок Data Type Duplicate	181
7.2.5. Блок IC	181
7.2.6. Блок Probe	182
7.2.7. Блок Rate Transition	183
7.2.8. Блок Width	185
7.3. S-модели задержки и хранения сигнала	186
7.3.1. Блок Integer Delay	186
7.3.2. Блок Memory	187
7.3.3. Блок Unit Delay	188

Глава 8. Подсистемы..... 189

8.1. Разновидности подсистем	189
8.2. Неуправляемые подсистемы	190
8.2.1. Команда Create Subsystem	190
8.2.2. Блок Subsystem	191
8.2.3. Параметры неуправляемых подсистем	192
8.2.4. Иерархическая структура S-модели системы	194
8.3. Управляемые условные подсистемы	195
8.3.1. Блок Enabled Subsystem	195
8.3.2. Блок Triggered Subsystem	199
8.3.3. Блок Enabled and Triggered Subsystem	203
8.4. Управляемые подсистемы, моделирующие логику управления потоком	203
8.4.1. Блок If Action Subsystem	203
8.4.2. Блок Switch Case Action Subsystem	208
8.4.3. Блок For Iterator Subsystem	211
8.4.4. Блок While Iterator Subsystem	215
8.5. Маскированные подсистемы	220

Глава 9. Собственная библиотека 233

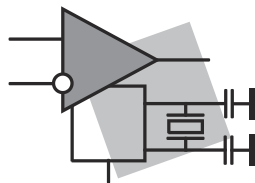
9.1. Создание собственной библиотеки	233
9.2. Создание групп блоков	235

Глава 10. Отладка S-модели системы.....	240
10.1. Метод блока и цикл моделирования	240
10.2. Запуск Debugger's GUI и окно отладчика.....	241
Часть II. Моделирование цифровой обработки сигналов средствами	
Simulink.....	249
Глава 11. Дискретные сигналы.....	251
11.1. Дискретные сигналы: библиотека блоков Simulink	251
11.1.1. Односигнальная последовательность.....	252
11.1.2. Многосигнальная последовательность	254
11.1.3. Одноканальная последовательность	255
11.1.4. Многоканальная последовательность	257
11.1.5. Одноканальная последовательность фреймов.....	260
11.1.6. Многоканальная последовательность фреймов	261
11.2. Дискретные сигналы: библиотека блоков Signal Processing Blockset	262
11.2.1. S-модели средств анализа дискретных сигналов	262
11.2.1.1. Блок Display.....	262
11.2.1.2. Блок Matrix Viewer.....	263
11.2.1.3. Блок Signal To Workspace.....	264
11.2.1.4. Блок Triggered To Workspace	265
11.2.1.5. Блок Time Scope.....	267
11.2.1.6. Блок Vector Scope	267
11.2.1.7. Блок Waterfall	272
11.2.2. S-модели дискретных сигналов	277
11.2.2.1. Блок Chirp.....	278
11.2.2.2. Блок Constant.....	279
11.2.2.3. Блок Constant Diagonal Matrix.....	279
11.2.2.4. Блок Discrete Impulse	280
11.2.2.5. Блок Identity Matrix.....	281
11.2.2.6. Блок Random Sources	281
11.2.2.7. Блок Signal From Workspace.....	282
11.2.2.8. Блок Sine Wave.....	283
11.2.3. Представление дискретных сигналов.....	286
11.2.3.1. Одноканальная последовательность	286
11.2.3.2. Многоканальная последовательность	287
11.2.3.3. Одноканальная последовательность фреймов.....	288
11.2.3.4. Многоканальная последовательность фреймов	289
11.3. Средства управления дискретными сигналами	290
11.3.1. Блок Buffer	291
11.3.2. Блок Unbuffer	293
11.3.3. Блок Flip	294
11.3.4. Блок Convert 1-D to 2-D	295
11.3.5. Блок Convert 2-D to 1-D	295

11.3.6. Блок N-Sample Enable	295
11.3.7. Блок N-Sample Switch	296
11.3.8. Блок Data Type Conversion	297
11.3.9. Блок Owerwrite Values	297
11.3.10. Блок Selector.....	297
11.3.11. Блок Submatrix	298
11.4. Операции с дискретными сигналами	298
11.4.1. Блок Constant Ramp	298
11.4.2. Блок Convolution.....	299
11.4.3. Блок Downsample.....	300
11.4.4. Блок Pad.....	301
11.4.5. Блок Peak Finder	303
11.4.6. Блок Repeat.....	305
11.4.7. Блок Upsample.....	306
11.4.8. Блок Window Function.....	306
11.4.9. Блок Zero Crossing.....	309
11.5. Генерирование типовых последовательностей.....	310
Глава 12. Линейные дискретные системы.....	312
12.1. Математическая модель и S-модель ЛДС	312
12.2. S-модели структур ЛДС	315
12.2.1. Блок Discrete Filter.....	316
12.2.2. Блок Discrete FIR Filter	317
12.2.3. Блок Discrete State-Space	318
12.2.4. Блок Discrete Zero-Pole	320
12.3. Анализ характеристик S-модели ЛДС	322
Глава 13. Системы цифровой фильтрации.....	324
13.1. Проектирование цифровых фильтров.....	324
13.2. Свойства КИХ-фильтров	325
13.3. Задание требований к частотным характеристикам КИХ-фильтров	326
13.4. Свойства БИХ-фильтров	329
13.5. Задание требований к частотным характеристикам БИХ-фильтров	330
13.6. Структуры цифровых фильтров	330
13.7. Математическая модель и S-модель системы цифровой фильтрации.....	333
13.8. S-модель ЦФ и средства ее создания	334
13.8.1. S-модель ЦФ в виде блока Digital Filter Design.....	334
13.8.2. S-модель ЦФ в виде блока из группы блоков Filter Design Toolbox	337
13.8.2.1. Блок Lowpass Filter	337
13.9. Анализ характеристик S-модели ЦФ	340
13.10. Примеры S-моделей ЦФ	341
13.11. S-модели систем цифровой фильтрации.....	351

Глава 14. Системы цифровой фильтрации с фиксированной точкой	353
14.1. S-модель ЦФ с ФТ и средства ее создания.....	353
14.2. Создание S-модели ЦФ с ФТ средствами блока Filter Realization Wizard	353
14.2.1. Синтез или импорт из Workspace исходного ЦФ	354
14.2.2. Расстановка звеньев и масштабирование в каскадных структурах БИХ-фильтров.....	356
14.2.3. Создание S-модели исходного ЦФ	360
14.2.4. Моделирование структуры ЦФ с ФТ	363
14.2.4.1. Установка свойств ЦФ с ФТ на вкладке Coefficients.....	364
14.2.4.2. Установка свойств ЦФ с ФТ на вкладке Input/Output.....	366
14.2.4.3. Установка свойств ЦФ с ФТ на вкладке Filter Internals.....	369
14.2.5. Создание S-модели ЦФ с ФТ	373
14.3. Создание S-модели ЦФ с ФТ в виде блока Digital Filter.....	374
14.4. Параметры блока Digital Filter.....	375
14.5. Создание S-моделей исходного ЦФ и ЦФ с ФТ программными средствами MATLAB	379
14.6. S-модели цифровых сигналов.....	380
14.7. S-модели систем цифровой фильтрации с ФТ	380
Глава 15. Средства вычисления ДПФ.....	384
15.1. Математическая модель ДПФ	384
15.2. S-модели средств вычисления ДПФ	386
15.2.1. Блок FFT.....	387
15.2.2. Блок IFFT.....	389
15.2.3. Особенности вычисления ДПФ в Simulink.....	389
15.3. Примеры S-моделей систем обработки сигналов с вычислением ДПФ.....	390
Глава 16. Многоскоростные системы ЦОС.....	398
16.1. Математическая модель системы однократной интерполяции.....	399
16.2. Математическая модель системы однократной децимации	402
16.3. Математическая модель системы однократной передискретизации.....	404
16.4. Полифазные структуры многоскоростных систем и их описание в MATLAB	405
16.5. S-модели многоскоростных систем	408
16.5.1. Блок FIR Interpolation.....	409
16.5.2. Блок FIR Decimation.....	411
16.5.3. Блок FIR Rate Conversion.....	411
16.6. Моделирование многоскоростной обработки сигналов	412
Список литературы	417
Список сокращений.....	419
Список сокращений на английском языке	419
Список сокращений на русском языке	419
Предметный указатель	421

Глава 1



Simulink как подсистема MATLAB

Система MATLAB (или коротко MATLAB) — это интерактивная система, предназначенная для компьютерного моделирования практически в любой области науки и техники. Она была создана в США компанией The MathWorks, Inc., и ее разработка для персональных компьютеров была представлена в начале 80-х годов. Информация о MATLAB доступна на сайтах www.mathworks.com, www.softline.ru, www.matlab.ru и www.exponenta.ru.

Изложение материала книги ориентировано на версии MATLAB R2009b—R2010a.

Мощный программный комплекс MATLAB состоит из *четырёх компонент*: MATLAB, Simulink, Toolbox и Blockset.

Компонент *MATLAB* представляет собой ядро системы — *ядро MATLAB*.

Компонент *Simulink* является подсистемой (расширением) MATLAB, предназначенной для блочного моделирования, однако, благодаря своим уникальным возможностям, этот компонент часто воспринимают как самостоятельную систему и называют *ядром Simulink*. Слово "simulink" образовано из комбинации первых четырёх букв слова "simulation" (моделирование) и "link" (соединение).

Компоненты *Toolbox* (Набор инструментов) и *Blockset* (Набор блоков) — это *пакеты расширения* MATLAB и Simulink соответственно, сгруппированные по специализированным приложениям, назначение которых отображается в их названиях.

1.1. Средства моделирования в MATLAB. Специфика Simulink

Для моделирования объектов и/или процессов в MATLAB предусмотрены следующие средства:

1. Программные средства.

Моделирование *программными средствами*, под которыми понимают средства алгоритмического языка MATLAB, выполняется в режиме прямых вычислений или в программном режиме MATLAB.

Программные средства универсальны, и другие средства разработаны на их основе. Моделирование ЦОС программными средствами рассматривалось в [22].

2. Стандартные программы GUI (Graphical User Interface — Графический интерфейс пользователя).

Моделирование средствами GUI выполняется в режиме *интерактивного общения* в среде конкретного GUI.

Средства GUI созданы на основе программных средств MATLAB, но позволяют исключить использование языка MATLAB в явном виде, что существенно упрощает технологию создания моделей, в том числе и с целью их дальнейшего использования в командном или программном режиме MATLAB.

Средства GUI предполагают знакомство с программными средствами MATLAB, по меньшей мере, на концептуальном уровне.

Моделирование ЦОС средствами GUI рассматривалось в [22].

3. Средства Simulink.

Моделирование в Simulink выполняется средствами блочного моделирования.

Средства Simulink созданы на основе программных средств MATLAB, но позволяют исключить или минимизировать использование языка MATLAB в явном виде, что существенно упрощает технологию моделирования.

Специфика моделирования в Simulink определяется его основным предназначением — *моделирование динамических систем* (Dynamic Systems).

Технология моделирования в Simulink заключается в построении модели системы из стандартных блоков и позволяет следить за ее работой с помощью стандартных средств наблюдения, поэтому моделирование в Simulink часто называют "визуальным".

В большинстве приложений динамическую систему можно фактически или условно представить как *систему обработки сигналов*, полагая, что понятия "сигнал" и "система" имеют широкое толкование, а именно:

- под *сигналом* понимается воздействие любой физической природы или последовательность данных;
- под *системой* понимается физическое устройство или математическое преобразование, выполняющее требуемое преобразование воздействия.

Компьютерная модель динамической системы строится на основе математических моделей сигналов и систем.

Моделированию ЦОС в Simulink и посвящается настоящая книга.

1.2. Принятые обозначения

Для удобства чтения в тексте книги использованы следующие шрифты:

- Times New Roman полужирный — для следующих обозначений:

- названия окон, например окно **Simulink Library Browser**;
- пункты меню и команды в пунктах меню, например команда **New** в пункте меню **File**;

- кнопки, вкладки, панели, поля, группы, раскрывающиеся списки и т. п. в окнах, например раскрывающийся список **Sampling mode** в окне **Source Block Parameters: Constant**;
 - первое упоминание имени группы блоков, например группа блоков **Sources**, а при последующих упоминаниях — группа блоков Sources;
 - параметры блоков, например параметр **Decimation** блока Clock;
- Courier New — для выделения:
- объектов на языке MATLAB, например `h=a+sin(b);`;
 - папок MATLAB и файлов пользователя, например папка `work`;
- Courier New полужирный — для описания объектов языка MATLAB при их первом упоминании, например команда **`simulink`**;
- курсив — для выделения ключевых слов или определений в тексте, например "библиотека Simulink имеет *иерархическую структуру*, представленную в виде дерева".

MATLAB не имеет русифицированной версии, поэтому при первом упоминании названий окон, пунктов меню, команд в пунктах меню, кнопок, вставок, параметров блоков и т. п. в скобках дается их перевод.

1.3. Установка и запуск Simulink

Simulink автоматически ставится при установке MATLAB.

При установке MATLAB пользователь может самостоятельно формировать состав MATLAB на своем компьютере из интересующих его пакетов расширения, пометив их флажком в окне **Product and Folder Selection** (Выбор пакетов и папок) в раскрывающемся списке **Select Products to install** (Выбор пакетов для инсталляции). Исключение составляют обязательные ядро MATLAB и ядро Simulink.

При желании можно легко расширить состав системы. Для этого следует повторить процедуру установки, пометив флажком дополнительные пакеты расширения.

Для широкого круга задач, решаемых методами цифровой обработки, помимо ядер MATLAB и Simulink, рекомендуется установить пакеты расширения MATLAB (Toolbox) и Simulink (Blockset), перечисленные в табл. 1.1. Пакеты, относящиеся к Simulink, выделены серым цветом.

Таблица 1.1. Рекомендуемые для установки пакеты расширения MATLAB

Название пакета	Назначение пакета
Communications Blockset	Системы связи
Communications Toolbox	Системы связи
Control System Toolbox	Системы управления
Curve Fitting Toolbox	Приближение кривых и данных

Окончание табл. 1.1

Filter Design Toolbox	Проектирование цифровых фильтров
Fixed Point Toolbox	Обработка данных с фиксированной точкой
Gauges Blockset	Измерительные приборы
Neural Network Toolbox	Нейронные сети
Optimization Toolbox	Методы оптимизации
Real-Time Windows Target	Целевые средства Windows для реального времени
Real-Time Workshop	Лаборатория реального времени
Signal Processing Blockset	Обработка сигналов
Signal Processing Toolbox	Обработка сигналов
Simulink Control Design	Системы управления
Simulink Fixed Point	Обработка данных с фиксированной точкой
Spline Toolbox	Сплайн-функции
Statistics Toolbox	Методы математической статистики
Symbolic Math Toolbox	Обработка символьных данных
System Identification Toolbox	Методы идентификации
Wavelet Toolbox	Вейвлет-функции

По завершении установки MATLAB на **Рабочем столе** автоматически создается ярлык MATLAB. Для запуска MATLAB достаточно щелкнуть на этом ярлыке.

После появления фирменной заставки автоматически открывается окно **MATLAB**, представляющее собой *комбинацию окон* (рис. 1.1), благодаря чему обеспечивается оперативность действий пользователя при работе.

Интерфейс **MATLAB** образуют следующие окна:

- ❑ **Command Window** (Командное окно) — основное окно интерактивной системы MATLAB с активизированной командной строкой;
- ❑ **Current Folder** (Текущая папка) — в этом окне выводится содержимое папки, имя которой отображается в раскрывающемся списке **Current Folder** на панели инструментов окна **MATLAB**. По умолчанию текущей считается папка со стандартным именем `work`, предназначенная для хранения файлов и папок, создаваемых пользователем;
- ❑ **Workspace** (Рабочая область памяти) — в этом окне выводится список текущих переменных, сохраняемых в рабочей области памяти Workspace до выхода из MATLAB;
- ❑ **Command History** (История команд) — в этом окне выводится построчный список объектов языка MATLAB, вводимых в ходе текущей и предшествующих сессий.

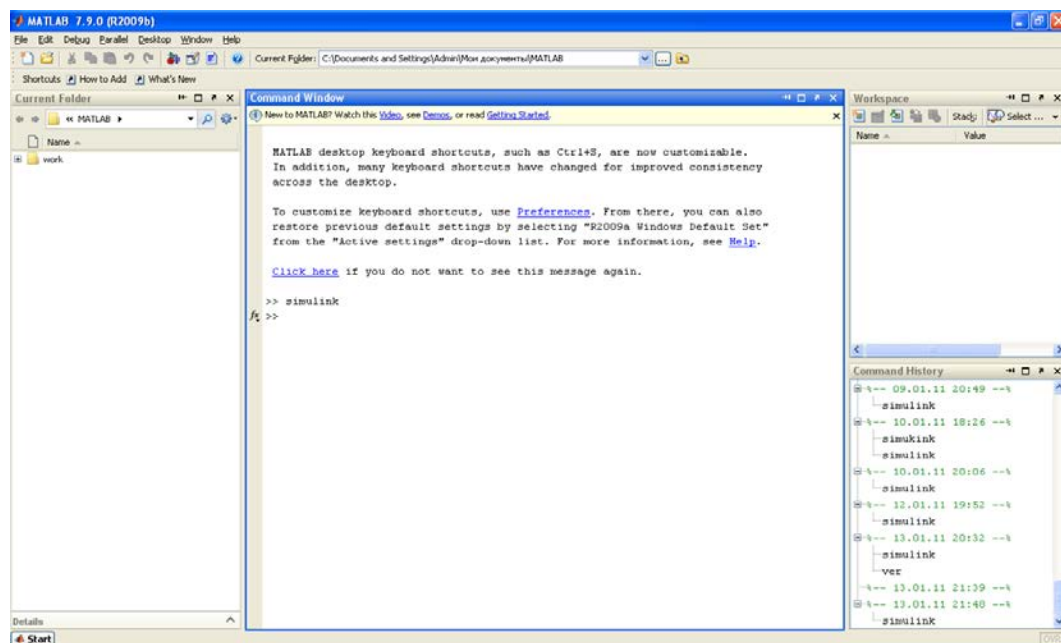


Рис. 1.1. Окно MATLAB

Пользователь может произвольно менять состав активных окон с помощью команд пункта меню **Desktop** (Стол). На рис. 1.1 представлена полная комбинация окон, соответствующая команде **Desktop Layout | Default** (Организация стола | По умолчанию).

Остальные пункты меню окна **MATLAB** типичны для интерфейса Windows и не требуют комментариев. Команды пункта меню **Debug** (Отладка) предназначены для работы в режиме программирования [22].

Вывод информации о версии MATLAB и включенных пользователем при установке пакетах расширения выполняется в окне по команде:

```
ver
```

Установка Simulink приводит к появлению кнопки **Simulink** на панели инструментов окна **MATLAB**.

Запуск Simulink осуществляется одним из следующих способов:

1. С помощью кнопки **Simulink** на панели инструментов окна **MATLAB**.
2. По команде в окне **Command Window**:

```
simulink
```

1.4. Библиотека Simulink

При запуске Simulink с помощью кнопки **Simulink** или по команде `simulink` открывается окно **Simulink Library Browser** (Каталог Библиотеки Simulink) (рис. 1.2).

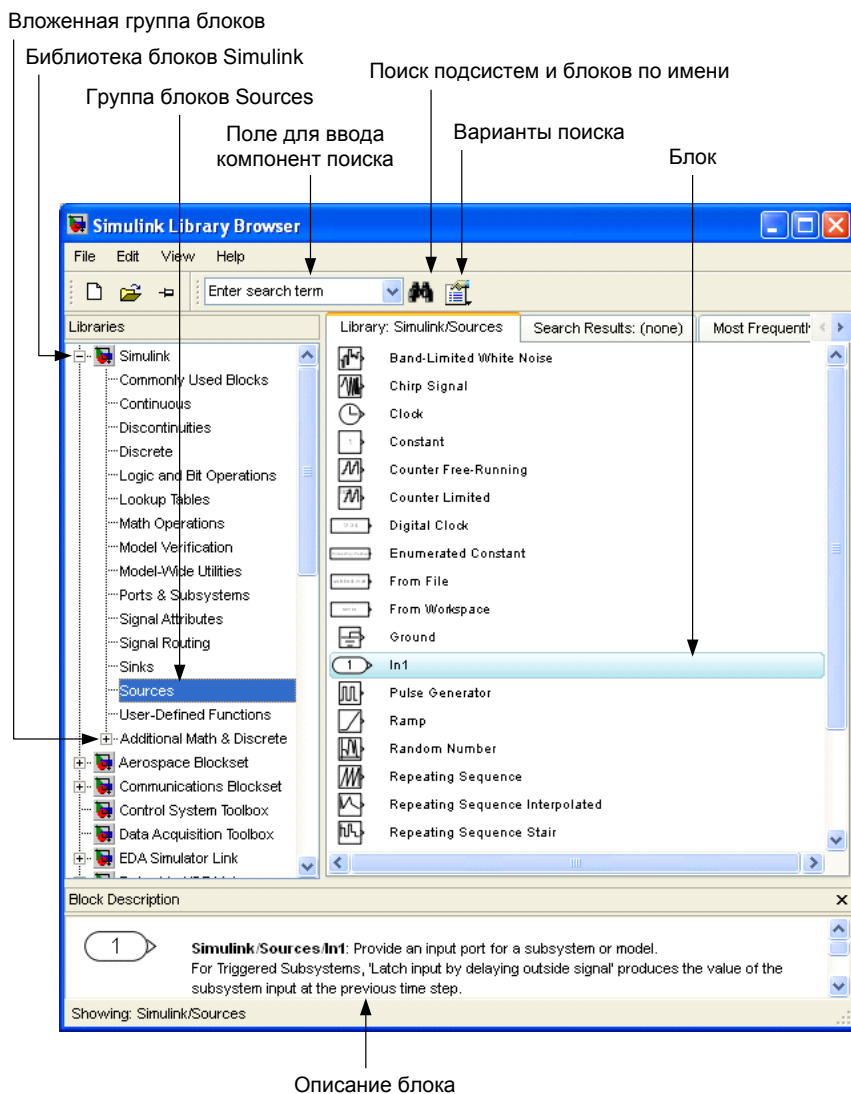


Рис. 1.2. Окно Simulink Library Browser

Интерфейс данного окна образуют следующие элементы:

- левая панель **Libraries** — с каталогом Библиотеки Simulink (Simulink Library);

Библиотека Simulink имеет иерархическую структуру, представленную в виде дерева.

В иерархической структуре Библиотеки Simulink можно выделить три уровня:

- верхний — узел дерева с пиктограммой, соответствующей поименованной библиотеке блоков (Block Library).

Первая из библиотек блоков (верхний узел дерева), входящих в состав Библиотеки Simulink, имеет такое же имя — Simulink;

- промежуточный — узел дерева без пиктограммы (или ветвь дерева), соответствующий поименованной *группе блоков* (Blocks).

Узлу дерева без пиктограммы соответствует *вложенная* группа блоков;

- нижний, соответствующий поименованному *блоку* (Block);

- правая панель — с тремя вкладками: **Library...** (Библиотека...), где вместо многоточия будет указан путь к объекту, выделенному на левой панели **Libraries**; **Search Results** (Результаты поиска); **Most Frequently Used Blocks** (Наиболее часто используемые блоки).

На открытой вкладке **Library...** отображается состав библиотеки или группы блоков, выделенной на левой панели **Libraries**. Пиктограммы *группы* блоков выделяются цветом, а пиктограммы *блоков* черно-белые.

Если на правой панели отображаются *группы* блоков, то состав любой из них можно открыть двойным щелчком левой кнопки мыши на ее пиктограмме.

Если на правой панели отображаются *блоки*, то двойной щелчок левой кнопки мыши на пиктограмме *блока* открывает окно его *параметров* с неактивными полями. Назначение и установка параметров блоков будет рассматриваться в рамках соответствующих тем.

На открытой вкладке **Search Results** отображаются результаты поиска, о котором речь пойдет далее в этом разделе;

- главное меню с пунктами:

- **File** (Файл) — работа с файлами моделей Simulink и с собственной библиотекой пользователя, о создании которой пойдет речь в *гл. 9*;
- **Edit** (Редактирование) — добавление в текущую модель Simulink блока, выделенного на правой панели, и поиск блока в библиотеке Simulink;
- **View** (Вид) — управление видом окна **Simulink Library Browser** и выводом состава библиотеки блоков.

Команда **Layout | List** (Расположение | Список) обеспечивает вывод состава библиотеки блоков в виде одного столбца, а команда **Layout | Grid** (Расположение | Сетка) — компактный вывод в виде нескольких столбцов (рис. 1.3, сравните с рис. 1.2);

- **Help** (Помощь) — обращение к разделу Simulink Системы помощи MATLAB;

- панель инструментов с кнопками, дублирующими основные команды пунктов главного меню;

- текстовое поле **Block Description** (Описание блока) — с краткой справкой о блоке, выделенном на правой панели; активизируется при выборе в пункте меню **View** команды **Show Block Descriptions** (Показать описание блока);

- поле ввода **Enter search term** (Введите компонент поиска), кнопка **Search for subsystems and block by name** (Поиск подсистем и блоков по имени) и кнопка

Search options (Варианты поиска) на панели инструментов (см. рис. 1.2) — используются для поиска подсистемы или блока по имени.

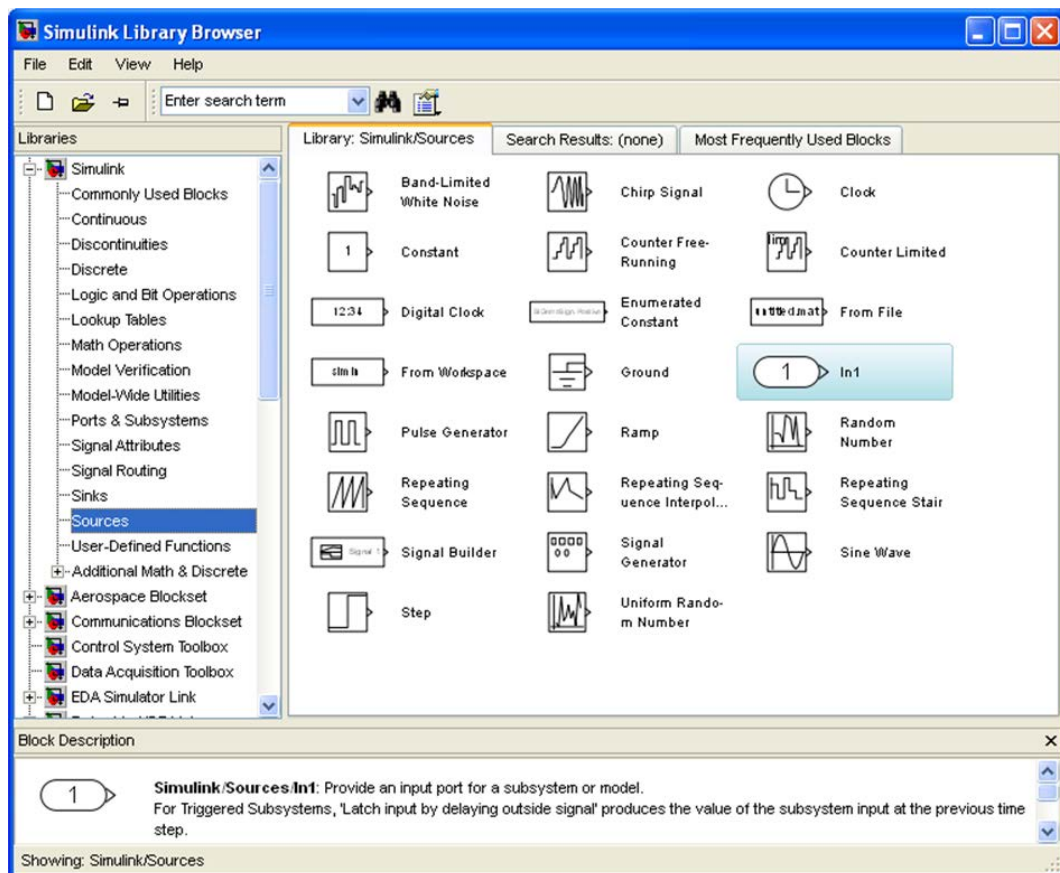


Рис. 1.3. Компактный вывод состава библиотеки блоков Simulink

Для поиска блока следует в поле ввода ввести его имя (полное или любую его часть) и нажать кнопку **Search options** (Варианты поиска). В открывшемся меню нужно установить требуемые флаги (один или несколько): **Regular expression** (Устойчивое выражение); **Match case** (Часть слова); **Match whole word** (Слово целиком). Затем нажать кнопку **Search for subsystems and block by name**. На правой панели автоматически откроется вкладка **Search Results**, имя которой автоматически изменится на **Found: '...'** (Найден: '...'), где в апострофах дублируется текст из поля ввода на панели инструментов, и на вкладке будут выведены результаты поиска блока с указанием библиотеки блоков (но без группы) или сообщение, если блок не найден.

На рис. 1.4 представлены результаты поиска по введенному слову "Constant" при установке флага **Match whole word**. Выведены все блоки, в имени которых присутствует это слово, с указанием библиотек блоков.

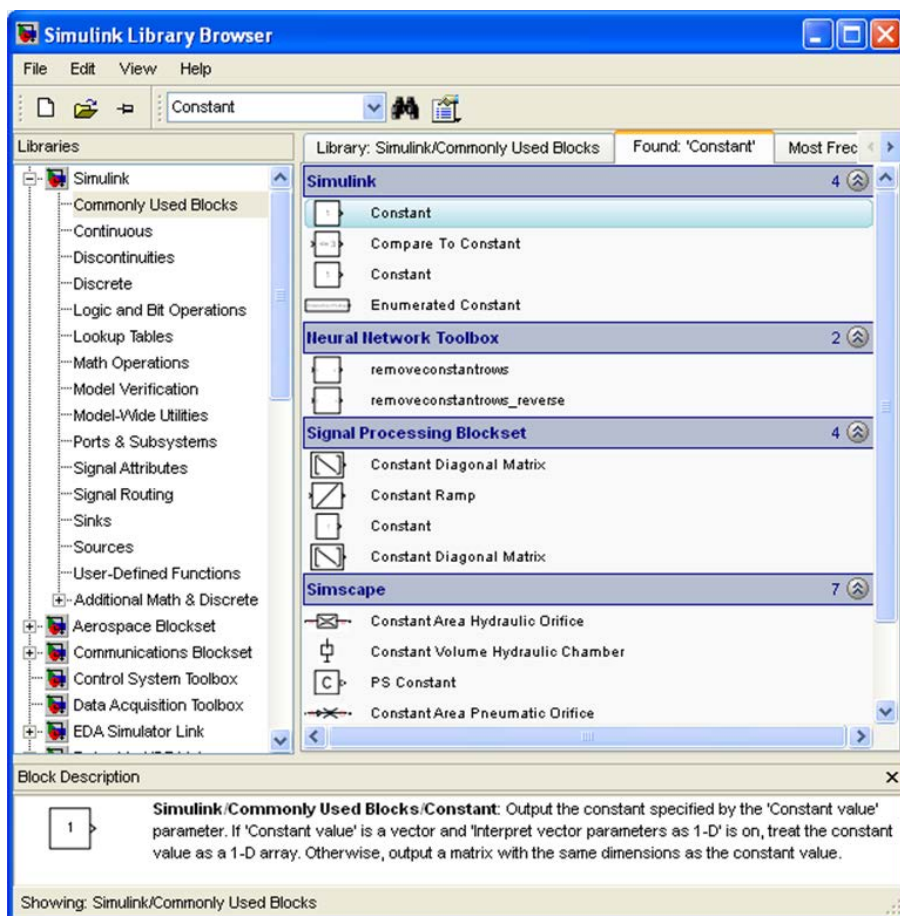


Рис. 1.4. Результаты поиска по слову "Constant" при установке флага **Match whole word**

Более подробную информацию по Библиотеке Simulink можно получить с помощью справочной системы MATLAB по Simulink в формате HTML в разделе **Simulink** → **User Guide** → **Simulink Graphical User Interface** → **Library Browser**. К этому разделу можно обратиться автоматически по команде меню **Help | Library Browser Help** в окне **Simulink Library Browser** (см. разд. 1.5.3).

1.5. Система помощи MATLAB

Помощь по Simulink организована в рамках системы помощи MATLAB, которая представляет собой совокупность следующих средств помощи пользователю:

- электронные справочные системы, а именно:
 - *встроенная справочная система* — формируется автоматически при установке системы MATLAB, исходя из ее состава, определяемого пользователем. Она является информативно наиболее краткой и содержит иллюстративные примеры, которые можно копировать и выполнять;

- *справочная система в формате HTML* (Hyper Text Markup Language — язык гипертекстовой маркировки) — автономна по отношению к системе MATLAB и содержится на отдельном CD-диске. Ее состав определяется пользователем при установке, подобно системе MATLAB, и, вообще говоря, может не совпадать с составом установленных пакетов расширения.

Эта справочная система информативно более полная, чем встроенная справка. В нее также включены иллюстративные примеры, которые можно копировать и выполнять в окне **Command Window**;

- *справочная система в формате PDF* (Portable Document Format — формат переносного документа) — также автономна по отношению к системе MATLAB. В комплекте MATLAB, начиная с версии 7.0, она на CD-диске не предоставляется, но доступна на сайте **www.mathworks.com**. Для чтения в формате PDF необходимо установить бесплатную программу Acrobat Reader.

Эта справочная система информативно наиболее полная и представляет собой так называемые "электронные книги", а точнее — серии книг, где каждая серия посвящена какой-то общей теме, а входящие в ее состав книги — конкретным вопросам в рамках данной темы. Подобно обычным книгам, электронные книги разбиты на главы и параграфы. Там, где это необходимо, справке по MATLAB с обязательными иллюстративными примерами предшествуют сведения теоретического характера со ссылками на литературу;

□ демонстрационные примеры.

В состав MATLAB включен значительный список демонстрационных примеров, в том числе относящихся к Simulink, которые позволяют составить представление о возможностях MATLAB и Simulink в решении самых разных задач.

1.5.1. Команда *help*

Команда `help` обеспечивает обращение к *встроенной справочной системе*.

Список команд Simulink можно вывести по команде:

```
>> help simulink
```

а справку о конкретной команде — по ее имени, например:

```
>> help load_system
```

1.5.2. Пункт меню *Help* окна *MATLAB*

Пункт меню **Help** в окне **MATLAB** обеспечивает обращение к *справочной системе в формате HTML* и демонстрационным примерам MATLAB.

Назначение команд определяется их названием. В целом, организация помощи по данным командам достаточно простая и легко осваивается самостоятельно.

Остановимся коротко на одной, главной, команде этого пункта меню и поясним необходимые действия для получения справки.

По команде меню **Help | Product Help** открывается окно **Help** — окно справочной системы в формате HTML, содержащее две панели (рис. 1.5):

□ левую панель с двумя вкладками:

- **Contents** (Содержание) — на этой вкладке выводится дерево, узлами которого являются разделы справочной системы MATLAB, при этом на правой панели отображается HTML-страница, соответствующая разделу, выделенному в дереве;
- **Search Results** (Результаты поиска) — на этой вкладке можно получить справку по ключевому слову (фразе), которое набирается на левой панели в поле ввода над вкладками, после чего нужно нажать клавишу <Enter>. На этой вкладке отобразится список разделов, где набранное слово (фраза) встречается в справочной системе MATLAB, а на правой панели будет выведена HTML-страница выделенного на вкладке раздела (рис. 1.6);

□ правую панель — для отображения HTML-страницы со справкой по разделу, выделенному на левой панели.

В верхней части правой панели имеется поле, в котором выводится путь к разделу, выделенному на левой панели.

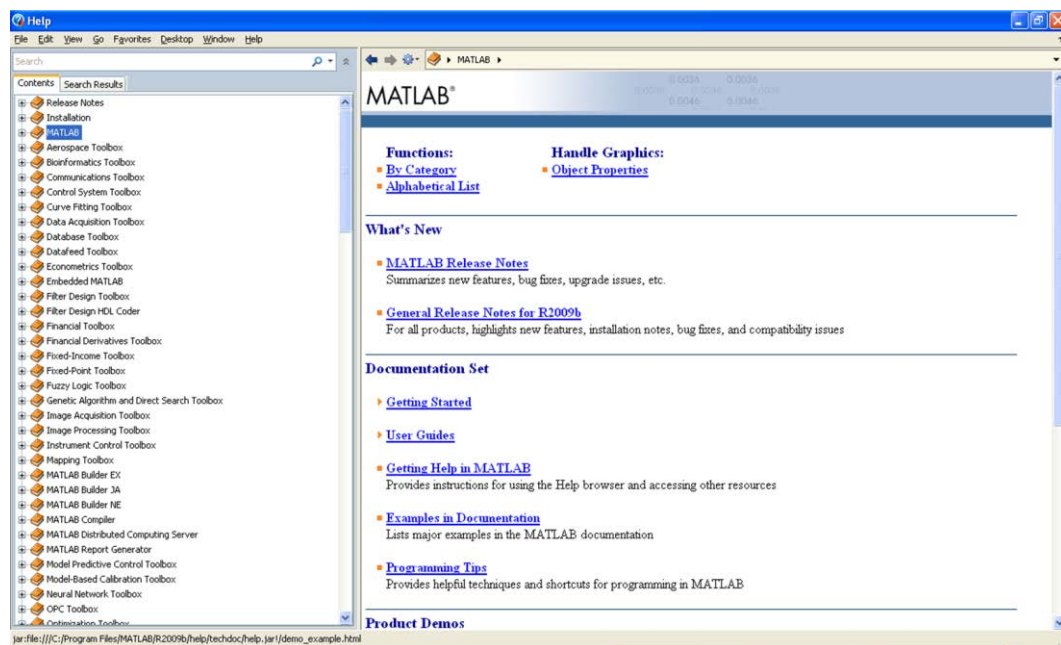


Рис. 1.5. Окно **Help** справочной системы MATLAB в формате HTML с открытой вкладкой **Contents**

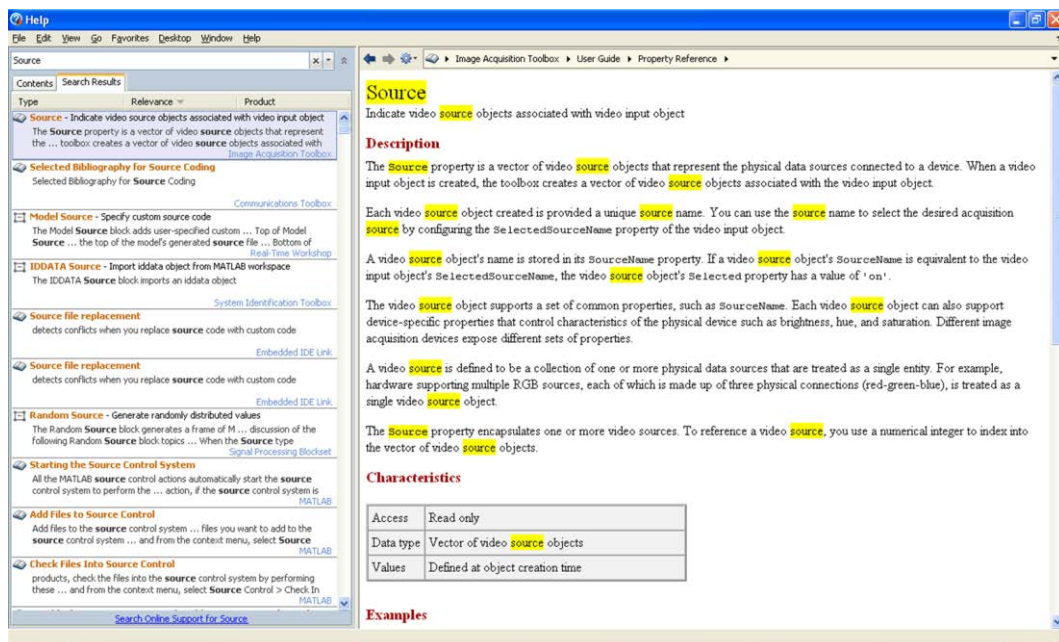


Рис. 1.6. Окно Help справочной системы MATLAB в формате HTML с открытой вкладкой Search Results и результатами поиска по ключевому слову "Source"

1.5.3. Пункт меню Help окна Simulink Library Browser

Пункт меню **Help** в окне **Simulink Library Browser** (см. рис. 1.2) обеспечивает обращение к справочной системе MATLAB в формате HTML непосредственно по разделу Simulink, включая демонстрационные примеры, и содержит следующие команды:

❑ Help for the Selected Block (Помощь по выделенному блоку).

По этой команде происходит автоматическое обращение к справочной системе MATLAB в формате HTML, при этом в окне **Help** будет открыта HTML-страница со справкой по блоку, выделенному на правой панели окна **Simulink Library Browser** (рис. 1.7);

❑ Library Browser Help (Помощь по каталогу библиотеки Simulink).

По этой команде происходит автоматическое обращение к HTML-странице со справкой по каталогу Библиотеки Simulink (Library Browser);

❑ Simulink Help (Помощь по Simulink).

По этой команде происходит автоматическое обращение к справочной системе MATLAB в формате HTML по всему разделу Simulink (рис. 1.8).

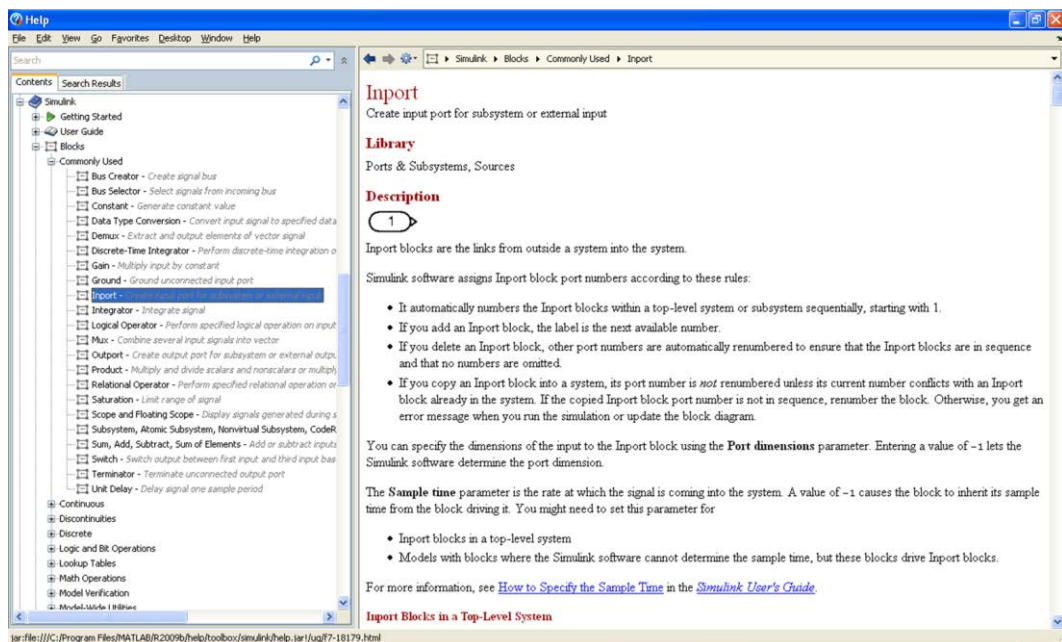


Рис. 1.7. Окно Help справочной системы MATLAB в формате HTML, открытое по команде **Help | Help for the Selected Block** из окна **Simulink Library Browser**, со справкой о блоке **Import**

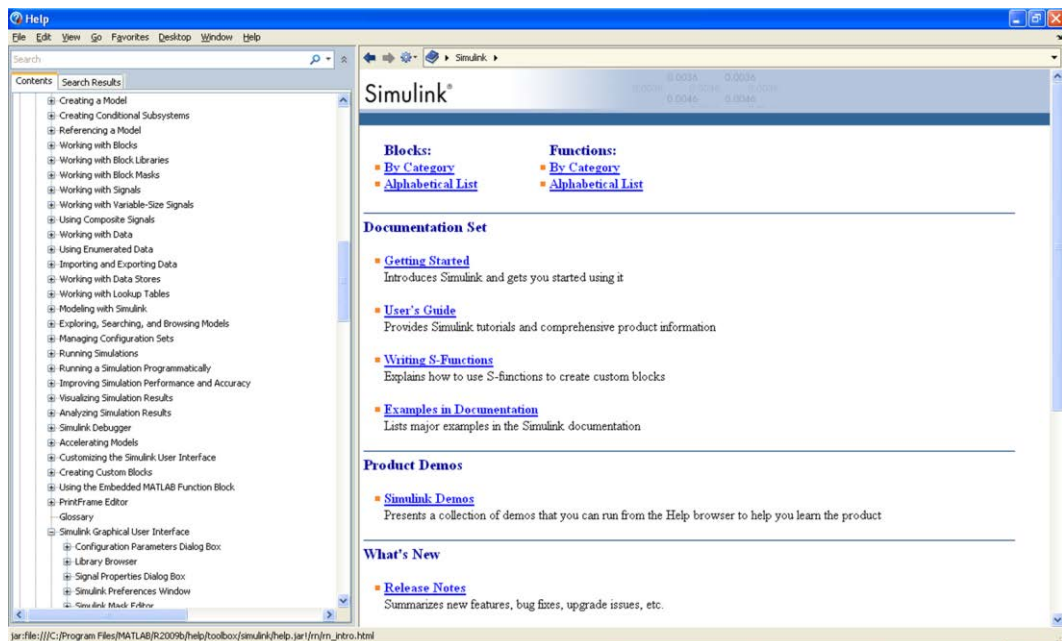
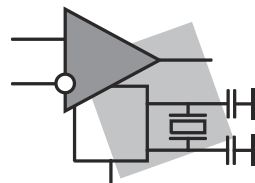


Рис. 1.8. Окно Help справочной системы MATLAB в формате HTML, открытое по команде **Help | Simulink Help** из окна **Simulink Library Browser**

Глава 2



Технология создания S-модели системы

Компьютерную модель системы, созданную средствами Simulink, будем называть *S-моделью системы* — сокращение от Simulink-модель.

В русскоязычной литературе в теории аналоговых, дискретных и цифровых систем под "моделированием системы" по умолчанию подразумевают моделирование процесса ее работы.

В справочной системе MATLAB по Simulink понятие "моделирование системы" (Modeling a System) относится скорее к *созданию* S-модели системы (т. е. к описанию *статической* системы средствами Simulink), а для моделирования *процесса работы* системы добавляют уточняющий термин — "моделирование *динамической* системы" (Modeling a Dynamic System).

Во избежание путаницы будем пользоваться русскоязычной терминологией, и в технологии моделирования системы в Simulink выделим две части:

1. Создание S-модели системы.
2. Моделирование системы.

Основные этапы технологии создания S-модели рассматриваются в этой главе, а моделирования системы — в гл. 3.

2.1. Математическая модель и S-модель системы

Ранее (см. разд. 1.1) система была условно определена как *система обработки сигналов*.

Напомним [23], что системой обработки сигналов называется объект, выполняющий требуемое преобразование входного сигнала (воздействия) в выходной (реакцию).

Математической моделью системы называют ее соотношение вход/выход, которое устанавливает связь между входным и выходным сигналами, и в общем случае имеет вид операторного уравнения (рис. 2.1, а):

$$Y = F(X), \quad (2.1)$$

где, X и Y — векторы входных и выходных сигналов соответственно (воздействий и реакций), в частном случае — один входной и один выходной сигналы;

F — оператор, определяющий математическое преобразование (линейное или нелинейное, алгебраическое или дифференциальное и т. д.).

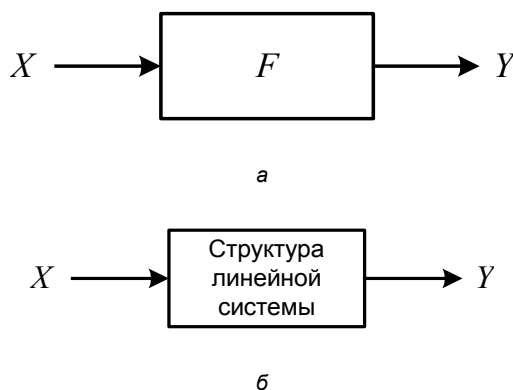


Рис. 2.1. К определению математической модели системы (а) и линейной системы (б)

Вид математической модели (2.1) определяют два фактора:

1. Тип системы.

Тип системы определяется типом обрабатываемых сигналов. Различают три основных типа систем [23]:

- *аналоговые* системы, преобразующие аналоговые входные сигналы в аналоговые выходные сигналы.

Аналоговым называют сигнал, непрерывный по времени и по состоянию. Такой сигнал описывается непрерывной или кусочно-непрерывной функцией;

- *дискретные* системы, преобразующие дискретные входные в дискретные выходные сигналы.

Дискретным называют сигнал, дискретный по времени и непрерывный по состоянию. Такой сигнал описывается числовой последовательностью (коротко — *последовательностью*);

- *цифровые* системы, преобразующие цифровые входные в цифровые выходные сигналы.

Цифровым называют сигнал, дискретный по времени и квантованный по состоянию. Такой сигнал описывается квантованной последовательностью.

2. Математическая форма представления оператора F .

Математическая форма представления оператора F определяется типом системы — *аналоговая* или *дискретная*, а также тем, *линейная* она или *нелинейная*.

В *линейных аналоговых* системах оператор F имеет две универсальные формы представления — *свертка* (интеграл) или *линейное дифференциальное преобразование*, а математическая модель (2.1) принимает соответственно вид