

Дьяконов В. П.

MATLAB и SIMULINK

для радиоинженеров

*Новейшие методы генерации
и обработки сигналов*

*Проектирование фильтров и
вычисление их характеристик*

Техника применения вейвлетов

*Моделирование и
проектирование радиоустройств*



УДК 32.973.26-018.2

ББК 004.438

Д93

Д93 Дьяконов В. П.

MATLAB и SIMULINK для радиоинженеров. – М.: ДМК Пресс, 2011. – 976 с.: ил.

ISBN 978-5-94074-492-4

Книга посвящена применению матричной системы MATLAB в радиотехнических расчетах и в моделировании радиоэлектронных устройств и систем. Впервые описаны новейшие версии MATLAB с пакетами расширения Simulink, Signal Processing Toolbox, Filter Design Toolbox, RF Toolbox и Blockset, Wavelet Toolbox, Control Systems, SimPowerSystems и др. Описаны новейшие пакеты Simscape и SimElectronics моделирования электронных схем. Наряду с функциями командного режима работы описан интерактивный и визуально-ориентированный инструментальный пакетов с графическим интерфейсом пользователя GUI и математическое моделирование систем и устройств в среде Simulink. Описана интеграция MATLAB с современными цифровыми радиоизмерительными приборами и виртуальными лабораториями для управления приборами и обработки реальных осциллограмм. Для научных работников, инженеров в области обработки и фильтрации сигналов и изображений, студентов и преподавателей университетов и вузов.

Дьяконов Владимир Павлович

MATLAB и SIMULINK для радиоинженеров

Главный редактор *Мовчан Д. А.*
dm@dmk-press.ru
Корректор *Синяева Г. И.*
Верстка *Чаннова А. А.*
Дизайн обложки *Мовчан А. Г.*

Подписано в печать 15.09.2010. Формат 70×100 ¹/₁₆.

Гарнитура «Петербург». Печать офсетная.

Усл. печ. л. 61. Тираж 1000 экз.

Web-сайт издательства: www.dmk-press.ru

Internet-магазин: www.aliants-kniga.ru

Все права защищены. Любая часть этой книги не может быть воспроизведена в какой бы то ни было форме и какими бы то ни было средствами без письменного разрешения владельцев авторских прав.

Материал, изложенный в данной книге, многократно проверен. Но поскольку вероятность технических ошибок все равно существует, издательство не может гарантировать абсолютную точность и правильность приводимых сведений. В связи с этим издательство не несет ответственности за возможные ошибки, связанные с использованием книги.

© Дьяконов В. П., 2011

ISBN 978-5-94074-492-4

© Оформление, издание, ДМК Пресс, 2011

Краткое оглавление

Введение	3
Предупреждения	40
Благодарности	41
Адреса для переписки	41
Глава 1. РАБОТА С MATLAB И SIMULINK	43
Глава 2. РАСЧЕТ ЦЕПЕЙ И МОДЕЛИРОВАНИЕ СИГНАЛОВ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ФИЛЬТРАЦИЯ СИГНАЛОВ	119
Глава 3. МОДЕЛИРОВАНИЕ И ФИЛЬТРАЦИЯ СИГНАЛОВ	253
Глава 4. СПЕЦИАЛЬНЫЕ СРЕДСТВА ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ И ПРОЕКТИРОВАНИЯ ФИЛЬТРОВ	315
Глава 5. ВЕЙВЛЕТЫ В ПАКЕТЕ WAVELET TOOLBOX	413
Глава 6. ПРИМЕНЕНИЕ ВЕЙВЛЕТОВ	505
Глава 7. ПРОЕКТИРОВАНИЕ РАДИОЧАСТОТНЫХ И ЭЛЕКТРОННЫХ ЦЕПЕЙ И УСТРОЙСТВ	595
Глава 8. ПРОЕКТИРОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ	675
Глава 9. МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ УСТРОЙСТВ И СИСТЕМ	801
Глава 10. РАБОТА MATLAB С ИЗМЕРИТЕЛЬНЫМИ ПРИБОРАМИ	881
Список литературы	970

Оглавление

Введение	33
Предупреждения	40
Благодарности	41
Адреса для переписки	41
Глава 1. Работа с MATLAB и SIMULINK	43
1.1. Назначение и особенности системы MATLAB	44
1.1.1. Назначение системы MATLAB	44
1.1.2. Особенности версии MATLAB 7.* + Simulink 6.* / 7.*	45
1.1.3. Особенности реализации версий MATLAB R2007a,b	46
1.1.4. Особенности реализации версий MATLAB R2008a,b	47
1.1.5. Особенности реализации версии MATLAB R2009a	47
1.2. Установка и файловая система MATLAB 7.*	48
1.2.1. Системные требования к установке	48
1.2.2. Инсталляция системы MATLAB R2007	49
1.2.3. Инсталляция системы MATLAB R2008/R2009	51
1.2.4. Файловая система MATLAB	53
1.3. Общие возможности MATLAB	53
1.3.1. Интеграция с другими программными системами	53
1.3.2. Ориентация на матричные операции	54
1.3.3. Расширяемость системы	55
1.3.4. Мощные средства программирования	56
1.3.5. Визуализация и графические средства	56
1.4. Начало работы с MATLAB R2008a	57
1.4.1. Запуск MATLAB и работа в режиме диалога	57
1.4.2. Классический интерфейс MATLAB	58
1.4.3. MATLAB в роли мощного научного калькулятора	59
1.4.4. Перенос строки в сессии	60
1.4.5. Запуск примеров применения MATLAB из командной строки	61

1.4.6. Ввод и вычисление математических выражений	62
1.5. Типы данных	62
1.5.1. Действительные числа и их форматы	62
1.5.2. Комплексные числа и функции работы с ними	63
1.5.3. Константы и системные переменные	64
1.5.4. Работа с массивами, векторами и матрицами	65
1.5.5. Текстовые комментарии	68
1.5.6. Переменные и работа с ними	68
1.5.7. Операторы и функции	69
1.5.8. Применение оператора : (двоеточие) числовой последовательности	71
1.5.9. Сообщения об ошибках и исправление ошибок	73
1.6. Элементы программирования с среде MATLAB	74
1.6.1. Функции пользователя	74
1.6.2. Управляющие структуры	75
1.6.3. Файлы-сценарии и файлы-функции	78
1.6.4. Основы работы с редактором файлов	81
1.7. Операции с рабочей областью, текстом сессии и редактором m-файлов	82
1.7.1. Дефрагментация рабочей области	82
1.7.2. Сохранение рабочей области сессии	83
1.7.3. Ведение дневника	83
1.7.4. Загрузка рабочей области сессии	85
1.7.5. Завершение вычислений и работы с системой	85
1.8. Графика системы MATLAB	86
1.8.1. Особенности графики системы MATLAB	86
1.8.2. Графики функций одной переменной	87
1.8.3. Построение графиков функций двух переменных (3D-типа)	89
1.8.4. Форматирования и редактирование графиков	92
1.9. Специальные средства графики	97
1.9.1. Обработка данных в графическом окне	97
1.9.2. Полиномиальная регрессия для табличных данных	97
1.9.3. Оценка погрешности аппроксимации	99

1.9.4. Расширенные возможности окна приближения кривых	101
1.9.5. Сплайновая и эрмитовая интерполяции в графическом окне	101
1.9.6. Графики разного типа в одном окне	103
1.9.7. Низкоуровневая дескрипторная графика	105
1.10. Работа со справкой и демонстрационными примерами MATLAB	106
1.10.1. Запуск справочной системы Help Desk	106
1.10.2. Работа с демонстрационными примерами	108
1.11. Пакет блочного имитационного моделирования Simulink	109
1.11.1. Доступ к пакету расширения Simulink	109
1.11.2. Построение диаграмм моделей в Simulink	111
1.11.3. Запуск моделей Simulink из среды MATLAB	114
1.11.4. Особенности интерфейса Simulink	114
1.11.5. Поиск и загрузка модели	115
1.11.6. Установка параметров компонентов модели и моделирования	116
1.11.7. Запуск процесса моделирования	118

Глава 2. Расчет цепей и моделирование сигналов	119
2.1. Символьные расчеты простых электронных цепей	120
2.1.1. Пакет символьной математики Symbolic Math Toolbox(tm)	120
2.1.2. Символьные функции и переменные	123
2.1.3. Символьные матричные операции	126
2.1.4. Символьные функции математического анализа	131
2.1.5. Символьные интегральные преобразования	138
2.1.6. Задачи на комбинированное соединение компонентов	143
2.1.7. Расчет передачи энергии от двух источников постоянного тока	144

2.1.8. Пример применения метода узловых потенциалов	145
2.1.9. Расчет мостовой схемы методом контурных токов	146
2.1.10. Примеры расчета цепей на переменном токе	147
2.1.11. Примеры расчета переходных процессов в <i>RC</i> -цепях	147
2.1.12. Применение интеграла Дюамеля	150
2.1.13. Расчет переходных процессов включения реле	151
2.1.14. Расчет и построение АЧХ и ФЧХ электрических цепей	152
2.2. Представление сигналов и зависимостей	155
2.2.1. Сигналы и их виды	155
2.2.2. Примеры моделирования сигналов средствами ядра MATLAB	157
2.2.3. Аппроксимация и интерполяция нелинейных зависимостей	161
2.2.4. Фурье-интерполяция периодических функций	168
2.2.5. Прохождение сигналов через искажающие устройства	169
2.2.6. Быстрые прямое и обратное преобразования Фурье	170
2.3. Начало работы с пакетом Signal Processing Toolbox	175
2.3.1. Назначение пакета Signal Processing Toolbox 6.0/6.1	175
2.3.2. Общепринятые сокращения и условные обозначения ...	176
2.3.3. Установка пакета Signal Processing Toolbox	177
2.3.4. Информационная поддержка пакета Signal Processing Toolbox	178
2.4. Работа с комплексными числами и массивами	181
2.4.1. Вычисление модуля комплексного числа — <i>abs</i>	181
2.4.2. Вычисление фазы комплексного числа — <i>angle</i>	182
2.4.3. Группирование комплексных чисел — <i>sortxpair</i>	182
2.4.4. Преобразование в инверсный битовый порядок — <i>bitrevorder</i>	183
2.4.5. Функция удаления элементов в массиве <i>downsample</i> ...	183
2.4.6. Добавление элементов в массив <i>upsample</i>	184
2.4.7. Дискретная фильтрация	185

2.5. Функции Signal Processing для моделирования сигналов	188
2.5.1. Косинусоида с переменной частотой — chirp	188
2.5.2. Функция Дирихле — diric	190
2.5.3. Синусоида, модулированная функцией Гаусса — gausspuls	191
2.5.4. Генерация Гауссового моноимпульса — gmonopuls	192
2.5.5. Генерация импульсов — pulstran	193
2.5.6. Генерация пилообразного или треугольного колебания — sawtooth	194
2.5.7. Функция sinc и интерполяция сигнала	195
2.5.8. Генерация прямоугольных импульсов — square	196
2.5.9. Генерация аperiodических треугольных импульсов — tripuls	197
2.5.10. Управляемый напряжением источник — vco	198
2.6. Функции задания окон	199
2.6.1. Назначение окон	199
2.6.2. Задание окна Бартлетта — bartlett	200
2.6.3. Задание окна Блэкмана — blackman	200
2.6.4. Задание прямоугольного окна — boxcar	201
2.6.5. Задание окна Чебышева — chebwin	201
2.6.6. Задание окна Хэмминга — hamming	201
2.6.7. Задание окна Хэннинга — hanning	202
2.6.8. Задание окна Кайзера — kaizer	202
2.6.9. Создание треугольного окна — triang	203
2.6.10. Новые функции задания окон	203
2.6.11. Обобщенная функция задания окон — window	204
2.6.12. Построение графиков амплитудного спектра окон	204
2.6.13. Применение вьювера окон VWTTool	206
2.7. Изменение частоты дискретизации сигналов	206
2.7.1. Децимация — decimate	206
2.7.2. Интерполяция сигналов — interp	208
2.7.3. Рациональное изменение частоты дискретизации — resample	210
2.8. Модуляция и демодуляция сигналов	212

2.8.1. Создание модулированных сигналов — modulate	212
2.8.2. Демодуляция сигналов — demod	213
2.8.3. Пофрагментный вывод сигналов — strips	214
2.9. Специальные операции с сигналами	215
2.9.1. Создание буфера кадров сигнала — buffer	215
2.9.2. Свертка одномерных сигналов — conv	216
2.9.3. Операция, обратная свертке — deconv	217
2.9.4. Свертка двумерная и многомерная — conv2 и convn	217
2.9.5. Дискретные сфероидальные последовательности — dpss	217
2.10. Дискретные быстрые преобразования Фурье	218
2.10.1. Прямое одномерное дискретное БПФ — fft	218
2.10.2. Перегруппировка выходного массива преобразования Фурье — fftshift	220
2.10.3. Обратное одномерное дискретное БПФ — ifft	221
2.10.4. Матрица дискретного преобразования Фурье — dftmtx	221
2.10.5. Прямое и обратное двумерное БПФ — fft2 и ifft2	222
2.11. Специальные виды преобразования сигналов ...	223
2.11.1. Прямое дискретное косинусное преобразование — dct	223
2.11.2. Обратное дискретное косинусное преобразование — idct	224
2.11.3. Z-преобразование по спиральному контуру — czt	224
2.11.4. Преобразование Гильберта — Hilbert	226
2.12. Кепстральный анализ	227
2.12.1. Комплексный кепстр действительной последовательности — sscps	227
2.12.2. Вещественный кепстр и минимально-фазовая реконструкция — rscps	228
2.12.3. Обратный комплексный кепстр — icscps	228
2.13. Спектральный анализ дискретных сигналов	228
2.13.1. Основы спектрального анализа дискретных сигналов	228
2.13.2. Параметры функций спектрального анализа	230

2.13.3. Метод Бурга — <code>pburg</code>	231
2.13.4. Ковариационный метод — <code>pcov</code>	233
2.13.5. Модифицированный ковариационный метод — <code>pmcov</code>	234
2.13.6. Многооконный метод — <code>pmtm</code>	234
2.13.7. Метод Уэлча — <code>pwelch</code>	235
2.13.8. Метод собственных значений — <code>peig</code>	237
2.13.9. Метод Юла-Уокера — <code>pyulear</code>	237
2.13.10. Метод классификации множественных сигналов — <code>pmusic</code>	238
2.13.11. Вычисление частот и мощностей по алгоритму MUSIC — <code>rootmusic</code>	239
2.13.12. Сравнение спектральных оценок разными методами	240
2.14. Статистика сигналов	241
2.14.1. Оценка КМК двух сигналов — <code>cohere</code>	241
2.14.2. Взаимная СПМ двух сигналов — <code>csd</code>	242
2.14.3. Вычисление корреляционной и ковариационной матриц — <code>corrcoef</code> и <code>cov</code>	244
2.14.4. Взаимная корреляционная функция — <code>xcorr</code> и <code>xcorr2</code> ...	244
2.14.5. Оценка матрицы автокорреляции — <code>corrmtx</code>	246
2.14.6. Взаимная ковариационная функция <code>xcov</code>	246
2.15. Средства визуализации спектра сигналов	246
2.15.1. Построение периодограмм — <code>periodogram</code>	246
2.15.2. Построение графиков спектральной плотности	247
2.15.3. Построение спектрограмм — <code>specgram</code>	248
2.15.4. Применение функции дискретного Фурье-преобразования <code>goertzel</code>	252

Глава 3. Моделирование и фильтрация

сигналов	253
3.1. Построение характеристик фильтров	254
3.1.1. Классификация фильтров	254
3.1.2. Основные структуры фильтров	256
3.1.3. АЧХ аналогового фильтра — <code>freqs</code>	257

3.1.4. Формирование отсчетов частоты — freqspace	259
3.1.5. АЧХ цифрового фильтра — freqz	260
3.1.6. Коррекция фазового сдвига — unwrap	261
3.1.7. Групповое время задержки — grpdelay	262
3.1.8. Импульсная характеристика цифрового фильтра — impz	263
3.1.9. Построение частотных зависимостей — freqzplot	264
3.1.10. Построение нулей и полюсов — zplane	265
3.1.11. Вычисление второй нормы фильтра — filternorm	266
3.2. Базовые функции фильтрации	267
3.2.1. Дискретная одномерная фильтрация — filter	267
3.2.2. Дискретная двумерная фильтрация — filter2	269
3.2.3. Цифровая фильтрация без фазовых искажений — filtfilt	269
3.2.4. Цифровая фильтрация решетчатым фильтром — latcfilt	269
3.2.5. Одномерная медианная фильтрация — medfilt1	269
3.2.6. Фильтрация фильтром Савицкого-Голея — sgolayfilt	270
3.2.7. Фильтрация каскадным фильтром — sosfilt	271
3.3. Преобразование описаний линейных систем	271
3.3.1. Вычисление коэффициентов передаточной функции по коэффициентам решетчатого фильтра — latc2tf	271
3.3.2. Масштабирование корней полинома — polyscale	272
3.3.3. Стабилизация полинома — polystab	273
3.3.4. Разложение на простые дроби — residuez	273
3.3.5. Функции представления линейных систем в пространстве состояний	273
3.4. Функции линейного предсказания	275
3.4.1. Прямые функции предсказания	275
3.4.2. Обратные функции предсказания	276
3.5. Параметрическое моделирование	276
3.5.1. Расчет параметров линейной AP-модели методом Бурга — arburg	276
3.5.2. Другие функции расчета параметров AP-модели	277

3.6. Аналоговые НЧ-фильтры — прототипы (АФП)	279
3.6.1. Расчет параметров АФП Бесселя — <code>besselap</code>	279
3.6.2. Расчет параметров АФП Баттерворта — <code>buttap</code>	279
3.6.3. Расчет параметров АФП Чебышева I рода — <code>cheb1ap</code>	280
3.6.4. Расчет параметров АФП Чебышева II рода — <code>cheb2ap</code>	280
3.6.5. Расчет параметров эллиптического АФП — <code>ellipap</code>	281
3.7. Проектирование базовых аналоговых и цифровых фильтров	282
3.7.1. Проектирование аналоговых фильтров Бесселя — <code>besself</code>	282
3.7.2. Проектирование фильтров Баттерворта — <code>butter</code>	284
3.7.3. Проектирование фильтров Чебышева I — <code>cheby1</code>	285
3.7.4. Проектирование фильтров Чебышева II — <code>cheby2</code>	286
3.7.5. Проектирование эллиптических фильтров — <code>ellip</code>	287
3.7.6. Расчет аналоговых фильтров по характеристикам прототипа — <code>lp2*</code>	288
3.7.7. Проектирование цифровых фильтров с БИХ	289
3.7.8. Выбор минимального порядка фильтров с БИХ	291
3.8. Дискретизация аналоговых фильтров	294
3.8.1. Билинейное преобразование — <code>bilinear</code>	294
3.8.2. Инвариантное импульсное преобразование — <code>impinvar</code>	297
3.9. Средства проектирования фильтров с конечной импульсной характеристикой	298
3.9.1. Вычисление матрицы свертки — <code>convmtx</code>	298
3.9.2. Метод Ремеза для фильтров с равными пульсациями — <code>remez</code>	298
3.9.3. Метод взвешивания — <code>fir1</code>	301
3.9.4. Метод взвешивания для фильтра с произвольной АЧХ — <code>fir2</code>	303
3.9.5. Метод наименьших квадратов — <code>fircls</code> , <code>fircls1</code> и <code>firls</code>	304
3.9.6. Расчет косинусного фильтра — <code>firrcos</code>	307
3.9.7. Расчет интерполирующего фильтра — <code>intfilt</code>	309

3.9.8. Использование окна Кайзера — kaiserord	311
3.9.9. Проектирование фильтров Ремеза — remez и remezord	312

Глава 4. Специальные средства обработки сигналов и проектирования фильтров

315

4.1. Графический интерфейс пакета Signal Processing	316
4.1.1. Назначение графического интерфейса пользователя GUI	316
4.1.2. Демонстрация модуляции/демодуляции — moddemo ..	316
4.1.3. Вьюверы окон — wintool и wvtool	319
4.1.4. Доступ к инструменту sptools	321
4.1.5. Браузер сигналов	321
4.1.6. Браузер спектра	325
4.2. Демонстрационные примеры на основе GUI	327
4.2.1. Доступ к демонстрационным примерам и средствам проектирования	327
4.2.2. Демонстрация z-преобразований — dztdemo	328
4.2.3. Демонстрация непрерывного и дискретного преобразований Фурье	329
4.2.4. Демонстрация методов спектрального оценивания	329
4.2.5. Пример проектирования полосового фильтра	332
4.2.6. Интерактивное проектирование ФНЧ	333
4.2.7. Демонстрация работы фильтра Савицкого-Голея	334
4.2.8. Демонстрация изменений АЧХ секционных фильтров второго порядка	334
4.3. Визуально-ориентированное проектирование фильтров	336
4.3.1. Проектировщик/анализатор фильтров — fdatool	336
4.3.2. Панели инструментов fdtool	339
4.3.3. Браузер фильтров	342
4.3.4. Проектировщик фильтров — Filter Designer	343

4.4. Пакет проектирования фильтров	
Filter Design Toolbox	345
4.4.1. Назначение пакета Filter Design Toolbox	345
4.4.2. Справка и документация по пакету Filter Design Toolbox	346
4.4.3. Фильтры и объекты класса Quantized (Q-типа)	347
4.4.4. Влияние погрешности вычислений	348
4.5. Основные функции пакета Filter Design Toolbox	349
4.5.1. Функции преобразования чисел и бинарных строк	349
4.5.2. Функции преобразования ячеек и фильтров	350
4.5.3. Функции конструирования Q-фильтров и оценки их свойств	351
4.5.4. Характеристики Q-фильтров	353
4.5.5. Функции дискретных Q-фильтров	356
4.5.6. Функции тестирования Q-фильтров	357
4.5.7. Функции Q-квантователей и их свойств	358
4.5.8. Функции анализа Q-квантователей	359
4.5.9. Q-БПФ (быстрое преобразование Фурье)	360
4.5.10. Функции конвертирования Q-фильтров	362
4.6. Техника проектирования Q-фильтров	363
4.6.1. Проектирование фильтров в командном режиме работы	363
4.6.2. Использование демонстрационных примеров	364
4.6.3. Адаптивная фильтрация зашумленной синусоиды	365
4.6.4. Адаптивная фильтрация с линейным предсказанием	368
4.6.5. Проектирование Q-фильтров на основе проектировщика фильтров	372
4.6.6. Создание Simulink-блока спроектированного фильтра	376
4.7. Взаимодействие с другими пакетами расширения	377
4.7.1. Пакеты расширения со средствами задания и обработки сигналов	377
4.7.2. Работа с пакетом Communication Toolbox	378

4.7.3. О применении пакетов инструментального ящика Blockset	381
4.8. Проектирование фильтров на специализированных микросхемах	381
4.8.1. Назначение пакета Filter Design HDL Coder	381
4.8.2. Возможности пакета Filter Design HDL Coder	382
4.8.3. Доступ к справке пакета Filter Design HDL Coder	382
4.8.4. Работа с демонстрационными примерами	384
4.9. Пакет расширения Signal Processing Blockset	389
4.9.1. Назначение пакета расширения Signal Processing Blockset 6.5	389
4.9.2. Состав блоков библиотеки пакета Signal Processing Blockset 6.5	389
4.9.3. Работа с источниками и получателями сигналов	390
4.9.4. Работа с блоками математических операций	391
4.9.5. Квантование сигналов и управление ими	394
4.9.6. Организация очереди, стека, сдвигового регистра и линии задержки	397
4.9.7. Подраздел Signal Attributes	399
4.9.8. Переключатели и счетчики	399
4.9.9. Обработка сигналов (раздел Signal Operations)	402
4.9.10. Раздел оценки блоков — DSP Estimation	403
4.9.11. Преобразования сигналов — раздел Transforms	404
4.9.12. Статистическая обработка данных — раздел DSP Statistics	404
4.9.13. Фильтрация сигналов (раздел Filtering)	406
4.10. Примеры моделирования систем на основе пакета SPB	407
4.10.1. Модель адаптивного фильтра RLS	407
4.10.2. Модель адаптивного фильтра Калмана	407
4.10.3. Модель стерео-экспандера	407
4.10.4. Модель анализатора спектра с оконным БПФ	409
4.10.5. Однополосная модуляция (SSB)	410
4.10.6. Адаптивная дельта-импульсная кодовая модуляция	411

Глава 5. Вейвлеты в пакете WAVELET TOOLBOX	413
5.1. Характеристика и место вейвлетов	414
5.1.1. Вейвлеты как новое научное направление	414
5.1.2. Список основных сокращений по вейвлетам	415
5.1.3. Ограничения и недостатки преобразования Фурье	416
5.1.4. Кратковременное (оконное) преобразование Фурье ...	418
5.1.5. Идея вейвлет-преобразования	419
5.2. Основы теории вейвлет-преобразований	422
5.2.1. Аппроксимирующая и детализирующая компоненты вейвлетов	422
5.2.2. Непрерывное прямое вейвлет-преобразование	425
5.2.3. Вейвлет-анализ сигналов с помощью спектрограмм ...	425
5.2.4. Вейвлеты в частотной области	426
5.2.5. Непрерывное обратное вейвлет-преобразование	427
5.2.6. Сравнение различных представлений сигналов	428
5.2.7. О скорости вычислений при вейвлет-преобразованиях	429
5.3. Кратномасштабный анализ	429
5.3.1. Ортогональные вейвлеты	429
5.3.2. Дискретное вейвлет-преобразование непрерывных сигналов	430
5.3.3. Суть кратномасштабного анализа	431
5.3.4. Точное и грубое разрешение	433
5.4. Частотный подход и быстрое вейвлет-преобразование	434
5.4.1. Частотный подход к вейвлет-преобразованиям	434
5.4.2. Основы вейвлет-фильтрации	435
5.4.3. Квадратурные фильтры	436
5.4.4. Быстрое вейвлет-преобразование и алгоритм Малла ...	438
5.4.5. Декомпозиция и реконструкция сигналов в Wavelet Toolbox	439
5.5. Специальные вопросы вейвлет-преобразований	440

5.5.1. Пакетные вейвлеты	440
5.5.2. Дискретный вейвлет-анализ и временные ряды	441
5.5.3. Двумерные вейвлеты	443
5.5.4. Вейвлет-компрессия сигналов и изображений и их очистки от шумов	443
5.6. Краткая характеристика пакета расширения Wavelet Toolbox	444
5.6.1. Назначение пакета Wavelet Toolbox	444
5.6.2. Техническая документация по пакету Wavelet Toolbox ...	445
5.6.3. Типы вейвлетов в пакете Wavelet Toolbox	446
5.6.4. Вейвлет-менеджер — wavemngr	447
5.7. Основные функции вейвлет-анализа	449
5.7.1. Центральная вейвлет-частота — centfrq	449
5.7.2. Уменьшение размера матрицы вдвое — dyaddown	451
5.7.3. Увеличение размера матрицы вдвое — dyadup	452
5.7.4. Интегрирование вейвлет-функции — intwave	453
5.7.5. Масштабирование к частоте — scal2frq	454
5.7.6. Аппроксимирующая и масштабирующие функции — wavefunavefun	455
5.7.7. Максимальный уровень вейвлет-разложения — wmaxlev	457
5.8. Семейство вейвлет-фильтров	457
5.8.1. Множество фильтров биортогонального вейвлета — biorfilt	457
5.8.2. Множество фильтров ортогонального вейвлета — orthfilt	459
5.8.3. Фильтры ортогональных или биортогональных вейвлетов — wfilters	460
5.8.4. Биортогональный сплайновый вейвлет-фильтр — biorwavf	461
5.8.5. Комплексный Гауссовский вейвлет — sgauwavf	461
5.8.6. Комплексный вейвлет Морлета — smorwav	462
5.8.7. Вейвлет-фильтр Коифлета — coifwavf	462
5.8.8. Вейвлет-фильтр Добеши — dbaux и dbwavf	463
5.8.9. Частотный В-сплайновый вейвлет — fbspwavf	464

5.8.10. Гауссовый вейвлет — <code>gauswavf</code>	464
5.8.11. Вейвлет «мексиканская шляпа» — <code>mexihat</code>	466
5.8.12. Вейвлет-функция Мейера — <code>meyer</code> и <code>meyeraux</code>	466
5.8.13. Вейвлет Морлета — <code>morlet</code>	468
5.8.14. Обратный биортогональный вейвлет-фильтр — <code>rbiowavf</code>	469
5.8.15. Вейвлет-фильтр Шеннона	469
5.8.16. Масштабирующие фильтры вейвлета Симлета — <code>symaux</code> и <code>symwavf</code>	469
5.8.17. Грубые (Crude) вейвлеты	470
5.8.18. Бесконечные регулярные вейвлеты	470
5.8.19. Ортогональные вейвлеты с компактным носителем	471
5.8.20. Биортогональные парные вейвлеты с компактным носителем	471
5.8.21. Комплексные вейвлеты	471
5.9. Утилиты управления построением деревьев	472
5.9.1. Обзор утилит управления построением деревьев	472
5.9.2. Построение дерева разложения пакетного вейвлета — <code>drawtree</code>	473
5.9.3. Построение дерева — <code>plot</code>	473
5.9.4. Построение цветной вейвлет-спектрограммы — <code>wrviewcf</code>	475
5.10. Основные утилиты	476
5.10.1. Кодированная версия матрицы — <code>wcodemat</code>	476
5.10.2. Утилита расширения — <code>wextend</code>	477
5.10.3. Извлечение — <code>wkeep</code>	478
5.10.4. Разворот вектора — <code>wrev</code>	479
5.11. Прочие функции	479
5.11.1. Обратное нестандартное БПФ — <code>instdfft</code>	479
5.11.2. Нестандартное прямое БПФ — <code>nstdfft</code>	479
5.11.3. Точки оценки — <code>wvarchg</code>	480
5.12. Особенности различных версий Wavelet Toolbox	480
5.12.1. Новые возможности пакета Wavelet Toolbox 2.1	480
5.12.2. Новая функция <code>disp</code>	481

5.12.3. Новая функция <code>wavfun2</code>	481
5.12.4. Особенности реализаций Wavelet Toolbox 3.* / 4.*	482
5.12.5. Конструктор вейвлетов по образцу для непрерывных вейвлет-преобразований	483
5.12.6. Функции моделирования дробного броуновского движения	485
5.12.7. Функции лифтинга	487
5.12.8. Функция слияния изображений и массивов	488
5.12.9. Многовариантная вейвлет-очистка сигналов	490
5.12.10. Анализ и обработка многомерных сигналов в Wavelet Toolbox V4.0	492
5.12.11. Функция <code>swttext</code> Wavelet Toolbox V4.2	494
5.12.12. Функции <code>swt2</code> и <code>iswt2</code> в Wavelet Toolbox V4.2	497
5.12.13. Другие возможности Wavelet Toolbox V4.2	498
5.12.14. Новые возможности компрессии изображений в Wavelet Toolbox V4.3	498
5.12.15. Новые возможности пакета Wavelet Toolbox V4.4	500

Глава 6. Применение вейвлетов

505

6.1. Непрерывное одномерное вейвлет-преобразование	506
6.1.1. Функция одномерного непрерывного вейвлет-преобразования — <code>swt</code>	506
6.1.2. Вейвлет-спектрограмма синусоиды с малыми разрывами	506
6.1.3. Вейвлет-спектрограмма степенной функции синуса ...	508
6.1.4. Вейвлет-представление сигнала с разрывами и шумом	509
6.1.5. Вейвлет-анализ реальных звуковых сигналов	510
6.2. Дискретное одномерное вейвлет-преобразование	512
6.2.1. Нахождение вейвлет коэффициентов одномерного преобразования — <code>appcoef</code>	512
6.2.2. Функция нахождения одномерных детализирующих коэффициентов — <code>detcoef</code>	513

6.2.3. Одноуровневое дискретное одномерное вейвлет-преобразование — <code>dwt</code>	515
6.2.4. Метод расширения вейвлет-преобразования — <code>dwtmode</code>	517
6.2.5. Одноуровневое обратное вейвлет-преобразование — <code>idwt</code>	518
6.2.6. Прямое восстановление из одномерных вейвлет-коэффициентов — <code>urcoef</code>	520
6.2.7. Одноуровневое восстановление одномерного вейвлет-разложения — <code>urwlew</code>	522
6.2.8. Многоуровневое одномерное вейвлет-разложение — <code>wavedec</code>	522
6.2.9. Многоуровневое одномерное wavelet восстановление — <code>waverec</code>	523
6.2.10. Восстановление одиночной ветви из одномерных вейвлет-коэффициентов — <code>wrcoef</code>	523
6.3. Средства GUI одномерного вейвлет-преобразования	525
6.3.1. Вызов окна GUI пакета Wavelet Toolbox — <code>wavemenu</code>	525
6.3.2. Просмотр вейвлетов — окно Wavelet Display	525
6.3.3. Доступ к демонстрационным примерам — <code>wavedemo</code> ...	530
6.3.4. Работа с демонстрационными примерами	531
6.3.5. Просмотр примера Short 1D scenario	534
6.3.6. Демонстрационные примеры GUI	535
6.4. Дискретное двумерное вейвлет-преобразование	537
6.4.1. Нахождение вейвлет коэффициентов двумерного преобразования — <code>appcoef2</code>	538
6.4.2. Функция нахождения двумерных детализирующих коэффициентов — <code>detcoef2</code>	538
6.4.3. Одноуровневое дискретное двумерное вейвлет-преобразование — <code>dwt2</code>	539
6.4.4. Одноуровневое дискретное двумерное обратное вейвлет-преобразование — <code>idwt2</code>	539
6.4.5. Прямое восстановление из двумерных вейвлет-коэффициентов — <code>urcoef2</code>	540

6.4.6. Многоуровневое двумерное вейвлет-разложение — <code>wavedec2</code>	541
6.4.7. Одноуровневое восстановление двумерного вейвлет-разложения — <code>upwlew2</code>	541
6.4.8. Многоуровневое двумерное вейвлет-восстановление — <code>waverec2</code>	542
6.4.9. Восстановление одиночной ветви из двумерных вейвлет-коэффициентов — <code>wrcoef2</code>	542
6.5. Пакетные вейвлет-алгоритмы	543
6.5.1. Наилучшее дерево уровня — <code>bestlevt</code>	543
6.5.2. Наилучшее дерево по критерию энтропии — <code>besttree</code> ...	545
6.5.3. Вычисление энтропии — <code>wentropy</code>	546
6.5.4. Обновление энтропии — <code>entrupd</code>	546
6.5.5. Извлечение вейвлет-дерева из пакетного дерева — <code>wp2wtree</code>	547
6.5.6. Пакетные вейвлет-коэффициенты — <code>wrcoef</code>	547
6.5.7. Сечение вейвлет-пакетного дерева <code>wrcutree</code>	549
6.5.8. Пакетное одномерное вейвлет-разложение — <code>wpdec</code> ...	549
6.5.9. Пакетное двумерное вейвлет-разложение — <code>wpdec2</code> ...	550
6.5.10. Пакетная вейвлет-функция — <code>wrpfun</code>	550
6.5.11. Перекомпонованный пакетный вейвлет — <code>wrjoin</code>	551
6.5.12. Восстановление коэффициентов пакетного вейвлета — <code>wprcoef</code>	552
6.5.13. Пакетное вейвлет-восстановление — <code>wprec</code> и <code>wprec2</code>	553
6.6. Дискретное стационарное вейвлет-преобразование	553
6.6.1. Дискретное стационарное одномерное вейвлет-преобразование — <code>swt</code>	553
6.6.2. Обратное одномерное стационарное дискретное <code>wavelet</code> преобразование — <code>iswt</code>	554
6.6.3. Дискретное стационарное двумерное вейвлет-преобразование — <code>swt2</code>	554
6.6.4. Обратное стационарное двумерное дискретное вейвлет-преобразование — <code>iswt2</code>	556

6.7. Удаление шумов и сжатие сигналов и изображений	556
6.7.1. Принципы очистки сигналов и шумов	556
6.7.2. Установка параметров по умолчанию — <code>ddencmp</code>	557
6.7.3. Выбор порога для удаления шумов — <code>thselect</code>	558
6.7.4. Штрафной порог для удаления шума — <code>wbmpen</code>	558
6.7.5. Порог одномерного вейвлета — <code>wdcbm</code>	559
6.7.6. Порог двумерного вейвлета — <code>wdcbm2</code>	561
6.7.7. Создание архива отпечатков пальцев	561
6.7.8. Автоматическое одномерное удаление — <code>wden</code>	562
6.7.9. Удаление шума и сжатие — <code>wdencomp</code>	565
6.7.10. Генерация тестовых сигналов — <code>wnoise</code>	567
6.7.11. Оценка шума одномерных вейвлет-коэффициентов — <code>wnoisest</code>	568
6.7.12. Штрафной порог для удаления шумов пакетного вейвлета — <code>wpbmpen</code>	569
6.7.13. Удаление шумов и сжатие с использованием пакетного вейвлета — <code>wpdencmp</code>	570
6.7.14. Пример очистки изображения от шума	570
6.7.15. Порог коэффициентов пакетного вейвлета — <code>wpthcoef</code>	571
6.7.16. Одномерный порог вейвлет-коэффициентов — <code>wthcoef</code>	571
6.7.17. Двумерный порог вейвлет-коэффициентов <code>wthcoef2</code> ..	572
6.7.18. Установка гибкого или жесткого порогов — <code>wthresh</code>	572
6.7.19. Управление параметрами порога — <code>wthrmngr</code>	573
6.8. Обзор основных применений вейвлет-технологии	573
6.8.1. Выявление тонких особенностей сигналов с помощью непрерывных вейвлетов	573
6.8.2. Статистическая обработка сигналов и их дискретных вейвлетов	575
6.8.3. Компрессия сигналов	578
6.8.4. Очистка сигнала от шума	579
6.8.5. Очистка сигналов от шумов с помощью стационарных вейвлетов	581

6.8.6. Оценка плотности сигналов	581
6.8.7. Регрессия по результатам оценки плотности сигналов	582
6.8.8. Расширение и экстраполяция сигналов	582
6.8.9. Двумерное вейвлет-разложение и реконструкция изображений	583
6.8.10. Двумерное пакетное вейвлет-разложение и реконструкция изображений	586
6.8.11. Компрессия изображения и очистка его от шума	587
6.8.12. Расширение изображений	589
6.9. Вейвлеты в пакете расширения Signal Processing Blockset	590
6.9.1. Реконструкция сигнала после вейвлет-фильтрации	590
6.9.2. Реконструкция сложного сигнала после вейвлет-фильтрации	591
6.9.3. Вейвлет-очистка нестационарного сигнала от шума	592

Глава 7. Проектирование радиочастотных и электронных цепей и устройств

595

7.1. Пакет расширения RF Toolbox	596
7.1.1. Назначение пакета расширения RF Toolbox	596
7.1.2. Системы параметров для объектов RF Toolbox	597
7.1.3. Объекты и методы радиочастотных цепей	598
7.1.4. Работа со справкой пакета RF Toolbox	600
7.1.5. Обзор функций пакета RF Toolbox	603
7.2. Работа с примерами применения пакета RF Toolbox	606
7.2.1. Пример работы объектами типа RF Circuit	606
7.2.2. Пример работы объектами типа RF Data	611
7.2.3. Демонстрационные примеры пакета RF Tools	615
7.3. Инструмент RFTool	616
7.3.1. Открытие окна инструмента RFTool	616
7.3.2. Загрузка примеров в RFTool	617

7.3.3. Визуализация результатов анализа с помощью RFTtool	618
7.4. Пакет расширения RF Blockset	621
7.4.1. Назначение пакета RF Blockset	621
7.4.2. Библиотека блоков пакета RF Blockset	622
7.4.3. Работа с математическими блоками	622
7.4.4. Блоки физических устройств	625
7.4.5. Применение блоков портов ввода/ вывода	625
7.4.6. Визуализация графических характеристик блоков	628
7.5. Примеры применения пакета RF Blockset	630
7.5.1. Сравнение реализаций усилителей	630
7.5.2. Моделирование фильтров на линиях передачи	631
7.5.3. Моделирование многокаскадных радиочастотных систем	634
7.5.4. Примеры совместного применения пакетов RF и Communication Blockset	635
7.6. Пакет расширения Simscape и его библиотека	637
7.6.1. Библиотека пакета расширения Simscape	637
7.6.2. Подраздел библиотеки Foundation Library	638
7.6.3. Подраздел библиотеки Electrical	638
7.6.4. Подраздел библиотеки Physical Signals	640
7.7. Примеры моделирования электронных устройств с применением пакета Simscape	642
7.7.1. Модели основных электро- и радиокомпонентов Simscape	642
7.7.2. Моделирование инвертирующего и неинвертирующего усилителей на основе идеального операционного усилителя	643
7.7.3. Моделирование усилителя с ограниченной полосой частот	645
7.7.4. Моделирование дифференцирующего устройства на основе идеального операционного усилителя	646
7.7.5. Линейная и нелинейные модели идеального биполярного транзистора	647

7.7.6. Моделирование каскадов с общим эмиттером на биполярном транзисторе	648
7.7.7. Моделирование нелинейной индуктивности	650
7.7.8. Моделирование мостового выпрямителя	651
7.8. Пакет моделирования электронных устройств SimElectronics	652
7.8.1. Назначение и библиотека блоков пакета SimElectronics	652
7.8.2. Подготовка диаграммы моделируемого устройства и ее пуск	657
7.8.3. Моделирование дифференцирующей RC-цепи	657
7.8.4. Моделирование дифференцирующей RC-цепи с отсекающим диодом	661
7.8.5. Моделирование каскада на полевом транзисторе с управляющим переходом	661
7.8.6. Построение диаграмм Боде для каскада на полевом транзисторе с управляющим переходом	662
7.8.7. Моделирование характеристикографов	664
7.8.8. Моделирование симметричного автоколебательного мультивибратора	666
7.8.9. Моделирование интегрального дифференциального каскада	667
7.8.10. Создание субблока дифференциального каскада	668
7.8.11. Моделирование интегральных логических схем с разными их моделями	668
7.8.12. Моделирование мостового измерителя усилий	672
7.8.13. Моделирование привода электромотора постоянного тока	672
7.8.14. Моделирование привода шагового двигателя	673

Глава 8. Проектирование и моделирование радиоэлектронных систем

675

8.1. Понятие о системах и их моделировании	676
8.1.1. Понятие о моделировании и моделях	676
8.1.2. Идентификация моделей и объектов моделирования ...	676

8.2. Основные характеристики (функции) систем	678
8.2.1. Передаточная характеристика	678
8.2.2. Импульсная характеристика	679
8.2.3. Переходная функция	679
8.2.4. Частотные характеристики	679
8.3. Теоретические модели объектов	680
8.3.1. Дифференциальные уравнения	680
8.3.2. Уравнения переменных состояния	680
8.3.3. Разностные уравнения	681
8.3.4. Дискретное Z-преобразование	681
8.3.5. Модели авторегрессии	682
8.3.6. Модель для переменных состояния	683
8.4. Методы оценивания	683
8.4.1. Оценивание параметрических моделей	684
8.4.2. Оценивание импульсной характеристики	684
8.4.3. Оценивание спектров и частотных характеристик	685
8.5. Пакет расширения System Identification Toolbox ...	686
8.5.1. Назначение пакета System Identification	686
8.5.2. Графический интерфейс System Identification Toolbox ...	687
8.5.3. Загрузка данных	688
8.5.4. Исследование исходных данных	689
8.5.5. Построение и анализ моделей	691
8.5.6. Оценка моделей	692
8.5.7. Сохранение модели	696
8.6. Функции командного режима пакета System Identification	696
8.6.1. Функции имитация и предсказание	697
8.6.2. Манипуляции с данными	699
8.6.3. Непараметрическое оценивание	701
8.6.4. Параметрическое и итерационное оценивание	705
8.6.5. Манипуляции с моделями	708
8.6.6. Выбор структуры модели	709
8.6.7. Преобразования модели	711
8.6.8. Анализ модели	712

8.6.9. Извлечения информации о модели	713
8.6.10. Проверка адекватности модели	714
8.6.11. Демонстрационные примеры пакета System Identification	717
8.7. Обыкновенные дифференциальные уравнения (ОДУ)	717
8.7.1. Определение ОДУ	717
8.7.2. Решатели ОДУ	718
8.7.3. Параметры и опции решателей систем ОДУ	720
8.8. Моделирование на основе решения систем ОДУ	723
8.8.1. Решение системы ОДУ Ван-дер-Поля	723
8.8.2. Вычисление реакции системы второго порядка на заданное воздействие	728
8.8.3. Решение системы дифференциальных уравнений с двухсторонними граничными условиями	729
8.8.4. Моделирование странного аттрактора Лоренца	731
8.8.5. Доступ к примерам на решение дифференциальных уравнений	732
8.8.6. Решения дифференциальных уравнений в частных производных	732
8.9. Пакет Control System Toolbox	734
8.9.1. Назначение пакета Control System	734
8.9.2. Классы вычислительных объектов пакета	735
8.9.3. Общая характеристика функций пакета	736
8.9.4. Вызов окна GUI	737
8.9.5. Загрузка моделей	739
8.9.6. Работа с редактором свойств	742
8.9.7. Установки графического интерфейса	742
8.9.8. Работа с инструментами sisotool и rltool	744
8.10. Работа с пакетом Control System в командном режиме	748
8.10.1. Создание моделей стационарных систем	748
8.10.2. Получение информации об отдельных характеристиках модели	754

8.10.3. Преобразование моделей	755
8.10.4. «Арифметические» операции с моделями	756
8.10.5. Модели для переменных состояния	758
8.10.6. Модели динамики	763
8.10.7. Моделирование временного отклика систем	770
8.10.8. Создание и представление временных задержек	774
8.10.9. Моделирование частотного отклика систем	775
8.10.10. Композиция систем	782
8.10.11. Редукция порядка модели	782
8.10.12. Традиционное проектирование систем	785
8.10.13. Аналитическое конструирование регуляторов	787
8.10.14. Синтез фильтра Калмана	788
8.10.15. Решение матричных уравнений	790
8.10.16. Виртуальная лаборатория по исследованию LCR-цепи	793
8.10.17. Моделирование системы с положительной обратной связью	795
8.10.18. Моделирование операционного усилителя с отрицательной обратной связью	796

Глава 9. Моделирование нелинейных устройств и систем

9.1. Оптимизации отклика систем	802
9.1.1. Назначение пакетов оптимизации откликов систем	802
9.1.2. Состав блоков пакетов	802
9.1.3. Демонстрация работы блоков пакетов оптимизации отклика	804
9.1.4. Оптимизация системы с PID-контроллером	805
9.1.5. Оптимизация системы магнитной «левитации» стального шарика	807
9.1.6. Оптимизация системы энергетического преобразователя	810
9.1.7. Функции пакета расширения Simulink Response Optimization	813
9.2. Моделирование коммуникационных систем	814

9.2.1. Пакеты расширения Communications Blockset и Communications Toolbox	814
9.2.2. Основы работы	815
9.2.3. Доступ к библиотеке пакета Communications Blockset ...	816
9.2.4. Источники и получатели коммуникационных сигналов ..	817
9.2.5. Регистраторы коммуникационных сигналов и построение глазковых диаграмм	818
9.2.6. Моделирование кодирования и декодирования	821
9.2.7. Моделирование модуляторов и демодуляторов	823
9.2.8. Библиотеки каналов	826
9.2.9. Библиотека модулей синхронизации	827
9.2.10. Применение блоков детектирования ошибок и коррекции	829
9.2.11. Блоки фильтров и эквалайзеров	831
9.2.12. Обзор других разделов библиотеки Communication Blockset	836
9.3. Пакет расширения SimPowerSystems	838
9.3.1. Назначение пакета расширения SimPowerSystems	838
9.3.2. Состав библиотек SimPowerSystems Blockset	838
9.3.3. Параметры и единицы их измерения	839
9.3.4. Источники электрической энергии и их применение	840
9.3.5. Библиотека компонентов Elements	842
9.3.6. Примеры моделирования RLC-цепей	844
9.3.7. Моделирование устройств с трансформаторами	847
9.3.8. Выключатели и ограничители пиковых напряжений	854
9.3.9. Моделирование линий передачи	856
9.3.10. Состав библиотеки силовой электроники	859
9.3.11. Моделирование ключей — идеального и диодного	860
9.3.12. Моделирование устройств с мощными ключевыми полевыми транзисторами	862
9.3.13. Моделирование устройств с тиристорами	863
9.3.14. Моделирование устройств с запираемыми Gto модулями	864
9.3.15. Моделирование устройств с силовыми IGBT модулями	865
9.3.16. Моделирование устройств с мостовыми модулями	867

9.3.17. Моделирование импульсного преобразователя с ключом на полевом транзисторе	869
9.3.18. Моделирование неуправляемых однофазных выпрямителей	871
9.3.19. Моделирование трехфазных выпрямителей	872
9.3.20. Моделирование однофазных инверторов	873
9.4. Построение уточненной модели ключа на мощном МДП-транзисторе	874
9.4.1. Построение субмодели мощного МДП-транзистора	874
9.4.2. Построение семейства ВАХ мощного МДП-транзистора	875
9.4.3. Динамическая модель мощного МДП-транзистора	877
9.4.4. Моделирование ключа на мощном МДП-транзисторе ...	879

Глава 10. Работа MATLAB

с измерительными приборами

10.1. Работа с компьютеризированной виртуальной лабораторией	882
10.1.1. Виртуальные PC-осциллографы фирмы Velleman	882
10.1.2. Анализатор спектра на базе виртуального осциллографа фирмы Velleman	884
10.1.3. Самописец на базе виртуального осциллографа фирмы Velleman	884
10.1.4. Работа с PC-осциллографом фирмы Velleman	885
10.1.5. Виртуальные функциональные генераторы фирмы Velleman	887
10.1.6. Работа с виртуальным функциональным генератором фирмы Velleman	887
10.1.7. Развертывание виртуальной лаборатории PC-Lab 2000	889
10.1.8. Специальные возможности лаборатории PC-Lab 2000	890
10.1.9. Передача осциллограмм в среду системы MATLAB	893
10.1.10. Взаимодействие MATLAB с виртуальным функциональным генератором	895

10.1.11. Импорт и экспорт спектрограмм	896
10.2. Современные измерительные системы	898
10.2.1. Построение измерительных систем	898
10.2.2. Порты для подключения измерительных приборов к компьютеру	899
10.3. Стыковка компьютера с цифровым осциллографом	901
10.3.1. Современные бюджетные цифровые осциллографы с USB-портом	901
10.3.2. Применение пакета расширения MATLAB — Instrument Control Toolbox	902
10.3.3. Идентификация осциллографа	903
10.3.4. MATLAB-программа для работы с цифровыми осциллографами TDS2000B	903
10.3.5. Спектральный анализ осциллограмм в MATLAB	908
10.3.6. Построение спектрограмм осциллограмм в MATLAB ..	912
10.4. Управление генераторами произвольных сигналов от системы MATLAB	914
10.4.1. От множества генераторов к одному генератору произвольных сигналов	914
10.4.2. Управление генераторами серии AFG3000 от системы MATLAB	915
10.4.3. Применение MATLAB при совместной работе генератора и цифрового осциллографа	918
10.5. Расширенная обработка в MATLAB реальных осциллограмм	919
10.5.1. Стыковка с MATLAB осциллографа Tektronix DPO 4101	919
10.5.2. Программа ввода в MATLAB осциллограмм двух каналов	923
10.5.3. Математические операции с сигналами двух каналов	925
10.5.4. Очистка осциллограммы от шума с помощью функции smooth	927
10.6. Расширенный спектральный анализ реальных осциллограмм в MATLAB	928

10.6.1. Фурье-преобразование и периодограммы для реальных осциллограмм	928
10.6.2. MATLAB-инструмент спектрального анализа SPTool ...	929
10.6.3. Построение спектра реальных осциллограмм различными методами	930
10.6.4. Оценка в MATLAB спектра реальных сигналов в виде пачек	933
10.7. Вейвлет-анализ реальных осциллограмм в MATLAB	936
10.7.1. Вейвлеты против рядов Фурье	936
10.7.2. GUI средства для работы с вейвлетами	938
10.7.3. Вейвлет-анализ пачек различных сигналов	940
10.7.4. Вейвлет-очистка осциллограмм от шума	941
10.7.5. Вейвлет-анализ модулированных сигналов	944
10.7.6. Вейвлет-спектрограммы сложных сигналов	947
10.7.7. Дискретный диадический вейвлет-анализ	949
10.7.8. Скейлингграммы в новых версиях Wavelet Toolbox	950
10.8. Компьютерная математика в цифровых измерительных приборах	952
10.8.1. Применение СКМ, установленных на ПК, подключенных к приборам	952
10.8.2. Установка СКМ внутри прибора на его жесткий диск	954
10.8.3. Аппаратная реализация средств компьютерной математики в осциллографах	955
10.8.4. Компьютерная математика в анализаторах сигналов, спектра и цепей	959
Список литературы	970

Работа с MATLAB и SIMULINK

1.1. Назначение и особенности системы MATLAB	44
1.2. Установка и файловая система MATLAB 7.*	48
1.3. Общие возможности MATLAB	53
1.4. Начало работы с MATLAB R2008a	57
1.5. Типы данных	62
1.6. Элементы программирования с среде MATLAB	74
1.7. Операции с рабочей областью, текстом сессии и редактором m-файлов	82
1.8. Гафика системы MATLAB	86
1.9. Специальные средства графики	97
1.10. Работа со справкой и демонстрационными примерами MATLAB	106
1.11. Пакет блочного имитационного моделирования Simulink	109

Основное назначение данной главы — сделать книгу вполне самостоятельной, несмотря на ее тематическую направленность на расчеты и математическое моделирование в радиоэлектронике. Разумеется, для более глубокого знакомства с системой MATLAB и пакетом расширения Simulink надо пользоваться дополнительной литературой по этой системе [18,19] и справкой по применяемой конкретно реализации MATLAB. В этой главе описаны основные реализации системы MATLAB 7.* — от MATLAB R2007b до последней на момент подготовки книги MATLAB R2009a. Основной материал от реализации практически не зависит.

1.1. Назначение и особенности системы MATLAB

1.1.1. Назначение системы MATLAB

MATLAB это матричная система компьютерной математики, предназначенная для автоматизации математических и научно-технических расчетов и построенная на расширенном представлении и применении матричных операций [1–39]. Это следует из названия системы — MATrix LABoratory это *матричная лаборатория*, т. е. обширный набор функций и операторов для осуществления векторных и матричных операций. Их число в MATLAB R2009a около 1000. Применение матриц [40, 41] и оператора последовательностей (:), как основных объектов системы, способствует уменьшению числа циклов, которые очень распространены при выполнении матричных вычислений на обычных языках программирования высокого уровня, и облегчению реализации параллельных вычислений. Кроме того новые реализации системы имеют эффективные алгоритмы параллельных вычислений и поддерживают многоядерные микропроцессоры современных ПК.

Матрицы широко применяются в сложных математических расчетах, например, при решении задач линейной алгебры и математического моделирования статических и динамических систем и устройств. Особенно широко матрицы применяются в расчетах, проектировании и математическом моделировании электронных и радиотехнических устройств. Они являются основой автоматического составления и решения уравнений состояния динамических объектов и систем. Примером программы, выполняющей это, может служить основное расширение MATLAB — Simulink [7, 11, 14, 31]. Оно существенно повышает интерес к системе MATLAB, вобравшей в себя лучшие достижения в области быстрого решения матричных задач за послевоенное время.

MATLAB в сущности является мощным *языком программирования*, ориентированным на технические и математические вычисления и способным превзойти возможности традиционных языков программирования, которые многие годы использовались для реализации численных методов. При этом особое внимание в системе уделялось как повышению скорости вычислений, так и адаптации системы к решению самых разнообразных задач пользователей.

Важными достоинствами системы являются ее *открытость* и *расширяемость*. Большинство команд и функций системы реализованы в виде m-файлов текстового формата (с расширением .m) и файлов на языке C/C++, причем все файлы доступны для модификации. Пользователю дана возможность создавать не только отдельные файлы, но и библиотеки файлов для реализации своих специфических задач. Любой набор команд в справке можно тут же исполнить с помощью команды Evaluate Selection контекстного меню правой клавиши мыши.

Объем документации по системе и ее пакетам расширения ныне составляет многие десятки тысяч страниц (см., например, [42–47] и др. фирменную документацию). Поэтому эта книга описывает достаточно полно только наиболее важные из пакетов расширения, относящиеся к ее тематике. Так, в этой главе даны основы работы с базовой системой MATLAB и основным пакетом расширения Simulink. При этом число описанных средств MATLAB и Simulink минимизировано — даны только те из них, которые нужны в первую очередь специалистам в радиоэлектронике.

1.1.2. Особенности версии MATLAB 7.* + Simulink 6.* / 7.*

Описанные ниже новейшие реализации системы MATLAB+Simulink R2007a, R2007b, R2008a, R2008b и R2009a относятся к обширной группе схожих версий MATLAB 7.*. В эти реализации введен ряд серьезных усовершенствований в сравнении с предшествующими реализациями. Так, улучшена работа с множеством документов, усовершенствованы редактор массивов и браузер рабочего пространства, расширены возможности редактора m-файлов (теперь в нем можно создавать программы не только в m-кодах, но и на языках HTML, Fortran, C/C++ и Java), введена целочисленная арифметика для больших целочисленных множеств, повышена скорость выполнения задач линейной алгебры и быстрого преобразования Фурье, введена фильтрация для больших массивов, улучшены решатели дифференциальных уравнения, введен ряд новых средств графики и т. д.

Начиная еще с версии MATLAB 6.5 в систему был введен *ускоритель времени исполнения* JIT (Just-In-Accelerator). Он резко (порой в сотни раз) ускоряет действие операций класса NUMERIC (кроме работы с числами одинарной разрядности Single), логических и строковых операций. Особенно эффективно выполнение матричных операций над полными матрицами и циклами. Разреженные массивы и матрицы ускорителем JIT не обслуживаются.

В MATLAB 7.* введены функции быстрого преобразования Фурье (FFT), использующие новую версию библиотеки FFTW3, ускорены загрузка и сохранение текстовых файлов, обеспечена более полная поддержка Windows XP, высвобождающая для MATLAB дополнительный 1 Гбайт памяти данных. Существенно усовершенствованы средства внешних интерфейсов и доступа к данным. Встроенный компилятор MATLAB Compiler 4 полностью поддерживает язык MATLAB, накладывая значительно меньше ограничений на возможность компиляции приложений.

Среда разработки MATLAB 7.* также существенно улучшена. В частности обновлен рабочий стол, переработаны редакторы массивов (Array Editor) и браузер рабочего пространства (Workspace Browser), введено новое средство Directory Reports, добавлена возможность запуска на выполнение отдельных фрагментов М-кода прямо из редактора и автоматизировано оформление М-кода в виде документов HTML, Word и LaTeX.

Для MATLAB 7 был разработан ряд новых пакетов расширения Их состав несколько различается от версии к версии. Из них, применительно к тематике данной книги, надо особо отметить пакет проектирования фильтров Filter Design HDL Coder и пакеты RF Toolbox и RF Blockset расчета и математического моделирования радиочастотных устройств. Существенно переработаны многие пакеты расширения: Communications Blockset и Communications Toolbox, Database Toolbox DSP Blockset (теперь он переименован в Signal Processing Blockset), Filter Design Toolbox, Fixed-Point Blockset, Mapping Toolbox, Optimization Toolbox, Wavelet Toolbox и др.

Столь внушительный список новинок и улучшений в системе MATLAB 7.* свидетельствует о том, что мы имеем действительно новые реализации системы. При этом, начиная с версии MATLAB R2007b в систему вошла уже новая реализация Simulink 7. Детали реализации каждой версии можно найти в разделе справки Release Notes по системе MATLAB и по любому интересующему пользователя пакету расширения.

1.1.3. Особенности реализации версий MATLAB R2007a,b

Большинство пользователей используют не самые последние реализации MATLAB. Поэтому стоит рассмотреть отдельные, наиболее существенные, различия различных реализаций системы. Сразу отметим, что применительно к тематике данной книги эти различия не очень принципиальны.

В 2007 г. на рынок поступили две очередные реализации системы MATLAB R2007a/R2007b. В самой системе MATLAB изменения коснулись следующих средств:

- Desktop Tools and Development Environment — средства работы с рабочим столом;
- Mathematics — новые средства математических вычислений;
- Data Analysis — средства анализа данных;
- Programming — средства программирования;
- Graphics and 3-D Visualization — средства графики и трехмерной визуализации;
- Creating Graphical User Interfaces (GUIs) — средства создания графического интерфейса пользователя;
- External Interfaces/API — средства внешнего интерфейса.

Модернизация пакета расширения Simulink 7 в MATLAB R2007b не существенная — расширились возможности виртуального осциллографа, широко ис-

пользуемая в моделях, и подверглись доработке некоторые пакеты из «ящика» Blockset. Учитывая сказанное, в дальнейшем мы не будем разделять реализации MATLAB 2007a и R2007b.

1.1.4. Особенности реализации версий MATLAB R2008a,b

Модернизация следующих реализаций MATLAB R2008a (версия 7.6) коснулась уже отмеченных средств системы MATLAB Version 7.5 (R2007b). Введено два новых пакета расширения, но к радиоэлектронике они отношения не имеют. Полная информация по нововведениям данной реализации есть в разделе Release Notes for R2008a справки.

Следом вышла промежуточная реализация MATLAB R2008a+ в которой был впервые введен пакет расширения SimElectronics 1.0. Кроме того в пакете расширения Symbolic Math Toolbox ядро системы компьютерной алгебры Maple было заменено (это кстати сделано и в реализации 14 системы Mathcad) ядром более молодой и дешевой системы MuPAD. Это, пожалуй, наиболее важные изменения в системе MATLAB. Не принципиально обновилась функция пакета Symbolic Math Toolbox 5.0. Более наглядными стали ноутбуки этого пакета расширения, но они в данной книге не используются.

В реализации MATLAB R2008b (версия 7.7) для специалистов в области радиоэлектроники значительный интерес представляет улучшение средств для математических вычислений. В новые средства вошла новая версия базовой библиотеки подпрограмм линейной алгебры (BLAS — Basic Linear Algebra Subroutine), обеспечивающая повышение скорости и точности матричных вычислений. Обеспечена поддержка разработанной корпорацией Intel библиотеки Math Kernel Library (MKL). Хорошо отработанный, но довольно старый пакет реализации вычислений линейной алгебры Linear Algebra Package (LAPACK) также подвергся существенной доработке и модернизации. Доработан и пакет Fastest Fourier Transform in the West (FFTW) быстрого преобразования Фурье.

В версию MATLAB R2008b были полноценно введены пакеты расширения Simscape и SimElectronics, содержащие расширенные средства для имитационного блочного моделирования электронных схем и устройств. Изменения в интерфейсе пользователя малы и специального рассмотрения не заслуживают. Это касается и математических возможностей системы — модернизировано всего несколько функций специального назначения. Желающие, тем не менее, ознакомиться с новинками последней версии MATLAB могут просмотреть раздел справки Release Notes системы.

1.1.5. Особенности реализации версии MATLAB R2009a

В новейшей (на момент подготовки книги) реализации MATLAB R2009a (версия 7.8) были продолжены усовершенствования системы. Применена последняя

реализация основного пакета расширения Simulink 7.3. Введен новый системный браузер, улучшен интерфейс (в том числе интерфейс справки), осуществлена интеграция текстового редактора с редактором m-файлов и отладчиком системы, обеспечена 64-битовая поддержка библиотек LINPACK и BLAS, улучшены алгоритмы работы нескольких функций, расширена поддержка принтеров при печати трехмерных графиков и т. д.

Все эти усовершенствования внешне практически незаметны и не имеют принципиального значения в рамках направленности данной книги на реализацию расчетов и моделирования в области радиоэлектроники. С их деталями можно познакомиться в разделах справки Release Notes этой версии системы и ее пакетов расширения.

1.2. Установка и файловая система MATLAB 7.*

1.2.1. Системные требования к установке

Новые версии системы MATLAB — весьма громоздкие программные комплексы, которые требуют до 1,5–4,5 Гбайт дисковой памяти (в зависимости от конкретной поставки, полноты справочной системы и числа устанавливаемых пакетов прикладных программ). Поэтому системы поставляются на DVD. Тем не менее, вся документация даже на нем не помещается и предусмотрен просмотр значительной ее части с помощью Интернета, где эта документация размещена в виде PDF-файлов.

Для успешной установки последней реализации MATLAB R2008b необходимы следующие минимальные программно-аппаратные средства:

- компьютер с микропроцессором Intel Pentium (Pentium IV и выше), Intel Celeron, Intel Xeon, Intel Core, AMD Athlon, AMD Opteron;
- устройство считывания компакт дисков (привод DVD) для установки, мышь, графический адаптер и монитор, поддерживающие не менее 256 цветов;
- операционная система Windows XP (Service Pack 1 or 2), Windows Server 2003 Service Pack 1 или or 2) или Windows Vista;
- ОЗУ емкостью 512 Мбайт для минимального варианта системы (рекомендуется иметь память не менее 1024 Мбайт);
- до 3500 Мбайт дискового пространства при полной установке всех расширений и всех справочных систем (610 Мбайт при установке только MATLAB со справкой);
- свободный USB-порт для подключения ключа, открывающего доступ к системе.

Кроме того, для использования расширенных возможностей системы нужны графический ускоритель, Windows-совместимые звуковая карта и принтер, текстовый процессор Microsoft Word для реализации Notebook, компиляторы язы-

ков Си/Си++ и/или ФОРТРАН для подготовки собственных файлов расширения и браузер Netscape Navigator 4.0 и выше или Microsoft Internet Explorer 5.0 и выше. Для просмотра файлов справочной системы в формате PDF нужна программа Adobe Reader или Adobe Acrobat 5.0 и выше.

В этой главе описана реализация MATLAB в массовой операционной среде Windows XP, хотя основные возможности системы MATLAB справедливы и при ее применении на других платформах. MATLAB легко устанавливается на новейших дешевых мобильных компьютерах — нетбуках с микропроцессором Intel Atom.

1.2.2. Инсталляция системы MATLAB R2007

Процесс инсталляции системы ранних реализаций MATLAB описан в [9, 12]. Поскольку данная книга посвящена новым реализациям MATLAB R2007/R2008 рассмотрим их инсталляцию более подробно. Инсталляция версий MATLAB R2007a,b с DVD в среде Windows XP происходит практически одинаково, так что ниже описана инсталляция MATLAB R2007b. Она происходит в 11 стадий, описанных ниже.

Для инсталляции надо вставить инсталляционный DVD в считыватель и дождаться распаковки инсталлятора. Если автозапуск диска на компьютере отключен, то надо запустить файл setup.exe в основной директории DVD. Она сопровождается выводом небольшого окошка линейного индикатора и затем окна с эмблемой MATLAB. После этого появляется первое окно инсталлятора — рис. 1.1. Его вид характерен и для других окон.

В этом окне надо установить опцию Install для инсталляции или опцию обновления лицензии и получения кода PLP (Personal License Password). Этот код является группой из 20 (и более) символов. Установив опцию Install нажмем мышью кнопку Next>. Появится окно для ввода данных пользователя

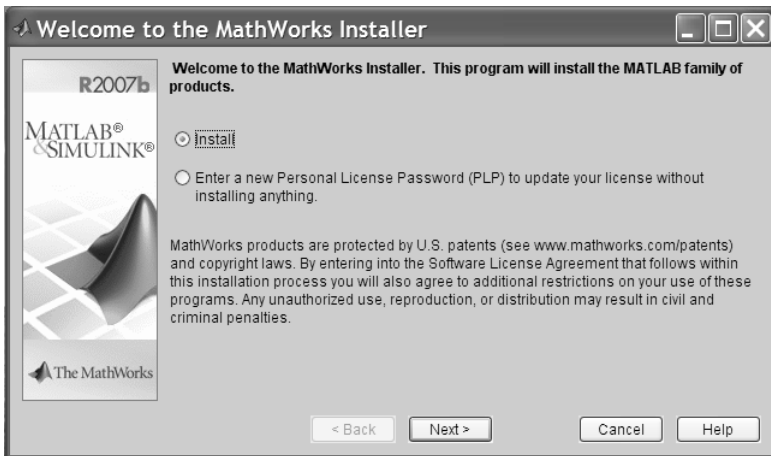


Рис. 1.1. Начальное окно инсталляции MATLAB R2007b

(имени и названия организации) и, главное, кода PLP. Этот код записывается в виде длинного списка и указывается на диске при продаже MATLAB 7 или запрашивается у MathWorks по Интернету.

Каждый легальный пользователь MATLAB ныне имеет свои страницы на этом Интернет-сайте с данными о лицензии, ее сроках и комплекте поставки MATLAB. С этой страницы можно получить коды PLP. После ввода кода PLP надо активизировать кнопку Next — будет выведено окно с текстом лицензии. Вы должны принять или отклонить знакомство с лицензией. Отклонение приведет к прекращению процесса инсталляции.

Если принимается условия лицензии, надо активизировать опцию Yes. Появится окно выбора типа инсталляции. В нем указан объем памяти на жестком диске (свободной и нужной для инсталляции). Окно предлагает два вида инсталляции: типичная Typical и по выбору пользователя Custom. В первом случае устанавливается базовая система MATLAB и все предусмотренные лицензией пакеты расширения. Во втором случае можно выбрать только нужные пользователю пакеты расширения. Следует отметить, что пакеты расширения оплачиваются дополнительно и многие из них довольно дороги. Для установки нового пакета расширения приходится фактически полностью повторить инсталляцию.

В любом варианте инсталляции следующее окно для задания директории (папки) в которую будут размещены файлы системы. По умолчанию папка создается в папке Program Files диска с операционной системой. Но пользователь может с помощью кнопки обзора Browse... выбрать любую папку или просто ввести ее полное имя в поле ввода.

Если быд выбран вид инсталляции Custom, то следующим появится окно выбора нужных пакетов расширения. Это окно показано на рис. 1.2.

Дальнейшие операции производятся в соответствии с простыми указаниями окон инсталлятора. Показанное на рис. 1.3 следующее окно служит для установки ряда опций.

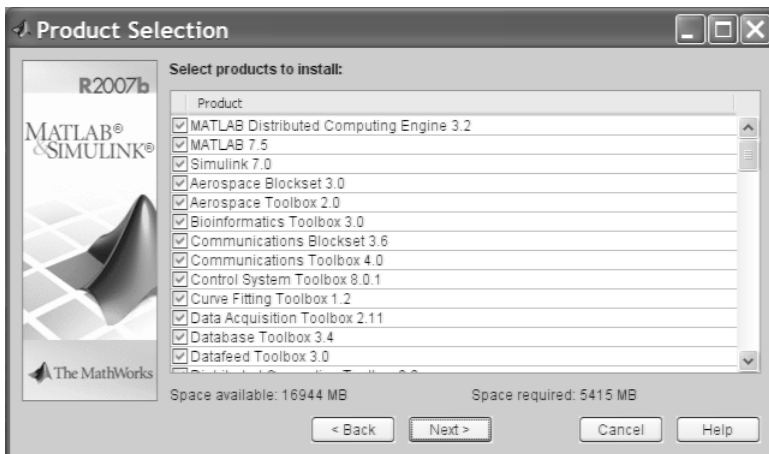


Рис. 1.2. Окно выбора пакетов расширения

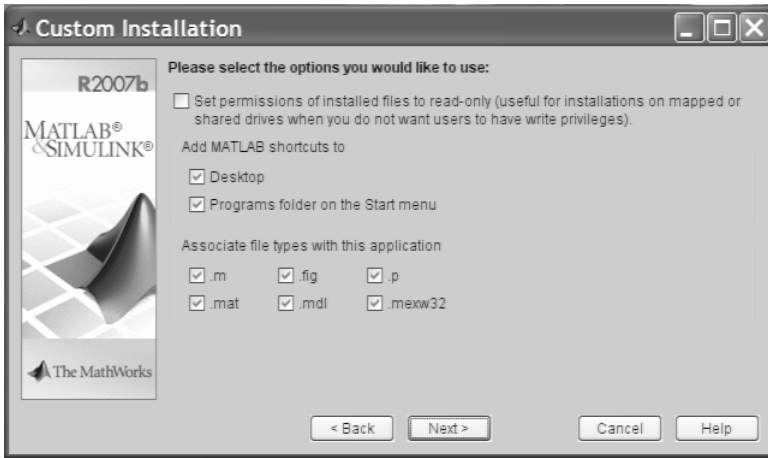


Рис. 1.3. Окно установки опций

Прежде всего это опции установки на рабочем столе Windows ярлыка запуска системы и установки ассоциации файлов с заданными расширениями с системой MATLAB.

Нажав кнопку `Next >` перейдем к последующим установкам. Следующее окно чисто информационное — оно просто информирует о том, какие пакеты расширения будут установлены. Нажав кнопку `Next >` перейдем к началу инсталляции. Она сопровождается выводом окна, контролирующего процесс установки файлов с помощью линейного индикатора. Процесс распаковки и установки файлов довольно длительный и даже на современных высокопроизводительных компьютерах занимает 20–30 минут.

После распаковки и установки всех файлов системы появляется информационное окно с примечаниями по конфигурации системы. Как правило конфигурация системы задается по умолчанию. Последним появляется окно с сообщением о завершении комплексной инсталляции. Активизировав кнопку `Finish` можно завершить инсталляцию. При этом окно инсталлятора исчезает а на рабочем столе появляется (если это было задано опцией) ярлык запуска системы.

Если пользователю предоставлен USB-ключ для доступа к программе, то перед пуском MATLAB надо установить этот ключ в свободное гнездо USB-порта. В противном случае при запуске появляется сообщение об ошибке с номером 9.

1.2.3. Инсталляция системы MATLAB R2008/R2009

На DVD поставляется и последние реализации системы MATLAB R2008a,b и MATLAB R2009a. Их инсталляция имеет некоторые особенности. Прежде всего надо отметить не принципиальное изменение внешнего вида окон инсталлятора — см. рис. 1.4.

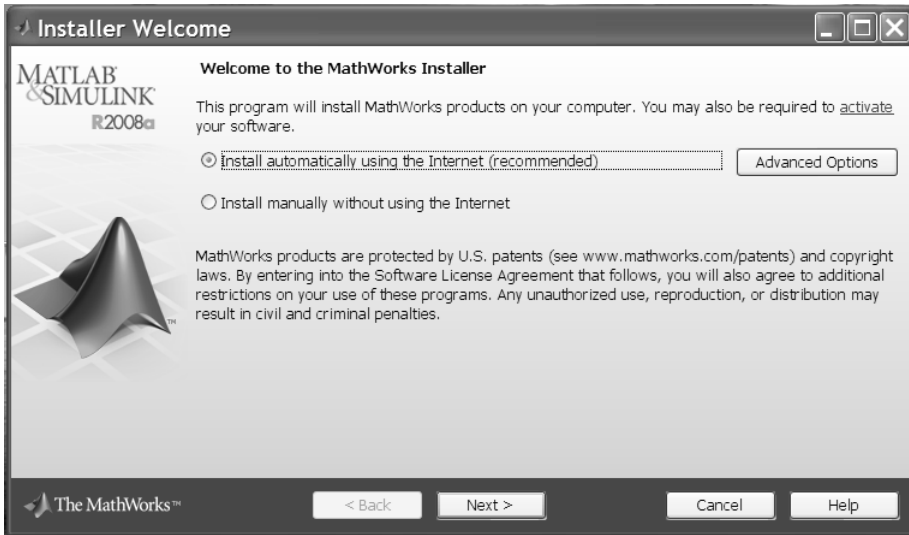


Рис. 1.4. Начальное окно инсталляции MATLAB R2008a

Из содержимого этого окна следует, что для этой реализации системы рекомендуется автоматическая инсталляция с использованием Интернета. Она проходит при минимальном участии пользователя и при условии, что компьютер подключен к Интернету. Впрочем, оставлен и вариант инсталляции пользователем «вручную», подобный описанному выше для систем MATLAB R2007a,b. Для этого варианта инсталляции нужен код PLP.

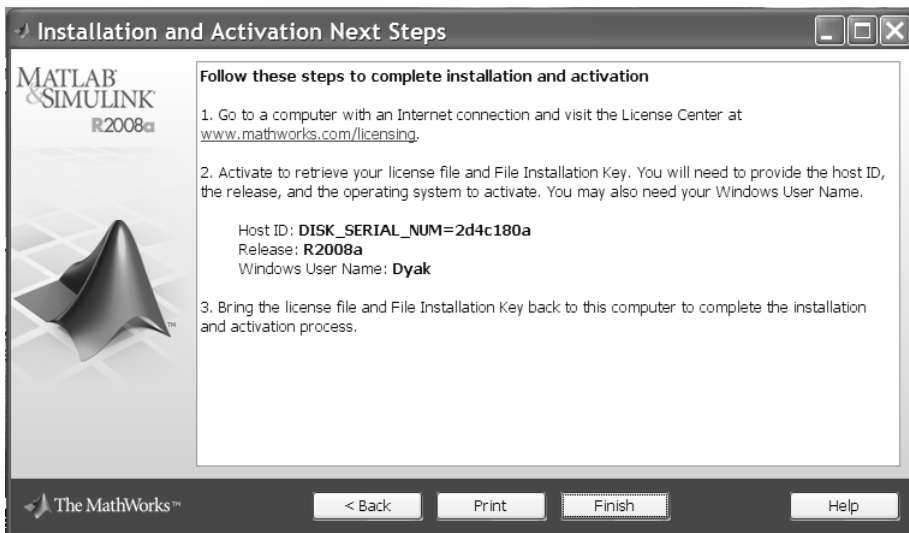


Рис. 1.5. Окно с информацией о переходе к активизации системы MATLAB R2008a

Еще одной особенностью применения систем MATLAB R2008a и MATLAB R2008b стала необходимость активизации установленной системы через Интернет — рис. 1.5. Инсталляция и активизация новой версии системы MATLAB R2008a затрудняет применение нелегальных копий ее и является средством борьбы с нелегальным распространением программных средств.

Активизация выполняется в несколько шагов, подобно описанной выше инсталляции. Детали активизации можно найти в справке по разделу *Instalation*. В течении активизации компьютер должен быть подключен к Интернету. Инсталляция и активизация новейшей реализации MATLAB R2009a выполняется аналогично.

1.2.4. Файловая система MATLAB

MATLAB состоит из многих тысяч файлов, находящихся в множестве папок. Полезно иметь представление о содержании основных папок, поскольку это позволяет быстро оценить возможности системы. Кроме того, нередко надо обеспечить путь к нужным для работы файлам системы, иначе содержащиеся в них команды не будут работать.

В MATLAB особое значение имеют файлы двух типов — с расширениями *.mat* и *.m*. Первые являются бинарными файлами, в которых могут храниться значения переменных. Вторые представляют собой текстовые файлы, содержащие внешние программы, определения команд и функций системы. Именно к ним относится большая часть команд и функций, в том числе задаваемых пользователем для решения своих специфических задач. Нередко встречаются и файлы с расширением *.c* (коды на языке Си), файлы с откомпилированными кодами MATLAB с расширением *.mex* и другие. Исполняемые файлы имеют расширение *.exe*.

Особое значение имеет папка *MATLAB/TOOLBOX/MATLAB*. В ней содержится набор стандартных *m*-файлов системы. Полный состав файлов каждой подпапки (их список содержится в файле *contents.m*) можно вывести на просмотр с помощью команды *help имя*, где *имя* — название соответствующей подпапки. В различных реализациях MATLAB возможны принципиальные отличия в наборе папок.

Рабочие файлы, создаваемые пользователем, обычно располагаются в папке *WORK*. Рекомендуется использовать ее как рабочую директорию.

1.3. Общие возможности MATLAB

1.3.1. Интеграция с другими программными системами

С системой MATLAB могут интегрироваться такие популярные математические системы, как *Mathcad*, *Maple* и *Mathematica* [1]. Есть тенденция и к объединению математических систем с современными текстовыми процессорами.

Так, новое средство последних версий MATLAB — Notebook [10, 13] — позволяет готовить документы в текстовом процессоре Word 95/97/2000/XP со вставками в виде документов MATLAB и результатов «живых» вычислений, представленных в численном, табличном или графическом виде.

В MATLAB задачи расширения системы решаются с помощью специализированных *пакетов*, входящих в инструментальный «ящик» Toolboxes. Многие из них содержат специальные средства для интеграции с другими программами, поддержки объектно-ориентированного и визуального программирования, для генерации различных приложений.

Новые свойства системе MATLAB придала ее интеграция с программной системой Simulink, созданной для имитационного моделирования блочно заданных динамических систем и устройств. Базируясь на принципах визуально-ориентированного программирования, Simulink позволяет выполнять моделирование сложных устройств с высокой степенью достоверности и прекрасными средствами представления результатов. Помимо естественной интеграции с пакетами расширения Symbolic Math и Simulink, MATLAB интегрируется с десятками мощных пакетов расширения, обзорно описанных в первом томе данной серии книг.

В свою очередь, многие другие математические системы, например Mathcad и Maple, допускают установление объектных и динамических связей с системой MATLAB, что позволяет использовать в них эффективные средства MATLAB для работы с матрицами. Эта прогрессивная тенденция интегрирования компьютерных математических систем, несомненно, будет продолжена.

1.3.2. Ориентация на матричные операции

Напомним, что двумерный массив чисел или математических выражений принято называть *матрицей*. А одномерный массив называют *вектором*. Элементами векторов и матриц могут быть числа различного формата, переменные и выражения.

Векторы и матрицы характеризуются *размерностью* и *размером*. Размерность определяет структурную организацию массивов в виде строки (размерность 1), страницы (размерность 2), куба (размерность 3) и т. д. Так что вектор является одномерным массивом, а матрица представляет собой двумерный массив с размерностью 2. MATLAB допускает задание и использование многомерных массивов, но в этой главе мы ограничимся только одномерными и двумерными массивами — векторами и матрицами.

Размер вектора — это число его элементов, а размер матрицы определяется числом ее строк m и столбцов n . Обратите внимание на наличие двух типов векторов — вектор-строка и вектор-столбец. Для получения вектора-столбца их вектора-строки (и наоборот) надо использовать операцию транспонирования вектора. Обычно размер матрицы указывают как mn , где m — число строк, а n — число столбцов матрицы. Матрица называется квадратной, если $m = n$.

Векторы и матрицы могут иметь имена, например, \mathbf{V} — вектор или \mathbf{M} — матрица. В данной книге имена векторов и матриц набираются полужирным шрифтом. Элементы векторов и матриц рассматриваются как *индексированные переменные*, например:

- \mathbf{V}_2 — второй элемент вектора \mathbf{V} ;
- \mathbf{M}_{23} — третий элемент второй строки матрицы \mathbf{M} .

Интересно отметить, что даже обычные числа и переменные в MATLAB рассматриваются как матрицы размера 11, что дает единообразные формы и методы проведения операций над обычными числами и массивами. Это также означает, что большинство вычислительных функций может работать с аргументами в виде векторов и матриц, вычисляя значения для каждого их элемента. Данная операция обычно называется *векторизацией* и обеспечивает упрощение записи операций, производимых одновременно над всеми элементами векторов и матриц, и существенное повышение скорости их выполнения.

1.3.3. Расширяемость системы

MATLAB — расширяемая система, и ее легко приспособить к решению нужных пользователю специфических классов задач. Ее огромное достоинство заключается в том, что это расширение достигается естественным путем и реализуется в виде так называемых m-файлов (с расширением `.m`), хранящихся на жестком диске. Объявлять о применении той или иной функции или процедуры, заданной m-файлом, не требуется.

Благодаря текстовому формату m-файлов пользователь может ввести в систему любую новую команду, оператор или функцию и затем пользоваться ими столь же просто, как и встроенными операторами или функциями. При этом, в отличие от таких языков программирования, как Бейсик, Си или Паскаль, не требуется никакого объявления этих новых функций. Но, поскольку новые определения в системе MATLAB хранятся в виде файлов на диске, это делает набор операторов и функций практически неограниченным.

В базовый набор слов системы входят спецзнаки, знаки арифметических и логических операций, арифметические, алгебраические, тригонометрические и некоторые специальные функции, функции быстрого преобразования Фурье и фильтрации, векторные и матричные функции, средства для работы с комплексными числами, операторы построения графиков в декартовой и полярной системах координат, трехмерных поверхностей и т. д. Словом, MATLAB предоставляет пользователю обширный набор готовых средств (большая часть из них — это внешние расширения в виде m-файлов).

Дополнительный уровень системы образуют ее *пакеты расширения*. Они позволяют быстро ориентировать систему на решение задач в той или иной предметной области: в специальных разделах математики, в физике и в астрономии, в области нейтронных сетей и средств телекоммуникаций, в математическом моделировании, проектировании событийно управляемых систем и т. д. Благодаря этому MATLAB обеспечивает высочайший уровень адаптации к решению задач конечного пользователя.

1.3.4. Мощные средства программирования

Система MATLAB с момента своего создания создавалась как мощный математико-ориентированный на технические вычисления язык программирования *высокого уровня*. И многие вполне справедливо рассматривали это как важное достоинство системы, свидетельствующее о возможности ее применения для решения новых, наиболее сложных математических задач.

MATLAB имеет *входной* язык. *Запись* программ в системе традиционна и потому привычна для большинства пользователей компьютеров. К тому же система дает возможность редактировать программы с помощью любого, привычного для пользователя текстового редактора. Имеет она и собственный редактор с отладчиком. Входной язык MATLAB интерпретатор, но с помощью встроенного компилятора и подключаемого к системе языка программирования C возможно создание откомпилированных машинных кодов [16]. Сам язык программирования MATLAB в этой книге описан обзорно, его более полное описание можно найти в [18] и во многих других книгах по системе MATLAB.

Язык системы MATLAB в части программирования математических вычислений намного богаче любого универсального языка программирования высокого уровня. Он реализует почти все известные средства программирования, в том числе объектно-ориентированное и визуальное программирование. Это дает опытным программистам необъятные возможности для самовыражения.

1.3.5. Визуализация и графические средства

В последнее время создатели математических систем уделяют огромное внимание *визуализации* всех стадий решения математических задач. Визуализация постановки задачи в MATLAB решается применением приложения Notebook и назначением именам функций достаточно ясных имен (идентификаторов). А визуализация результатов вычислений достигается применением обширных средств графики, в том числе анимационной, а также использованием (там, где это нужно) средств символьной математики.

Новые графические средства Handle Graphics (дескрипторная или описательная графика) позволяют создавать полноценные объекты графики высокого разрешения, как геометрического, так и цветового. Возможности этой графики поддерживаются *объектно-ориентированным программированием*, средства которого также имеются в языке программирования системы MATLAB. Применение дескрипторной (описательной) графики позволяет создавать и типовые элементы пользовательского интерфейса — кнопки, меню, информационные и инструментальные панели и т. д., то есть реализовать элементы *визуально-ориентированного программирования*.

Графики можно выводить в одно или в несколько окон. А в статьях и книгах формата Notebook, реализованных при совместной работе системы

MATLAB с популярным текстовым процессором Word 95/97/2000/XP, графики могут располагаться вместе с текстом, формулами и результатами вычислений (числами, векторами и матрицами, таблицами и т. д.). В этом случае степень визуализации оказывается особенно высокой, поскольку документы класса Notebook по существу являются превосходно оформленными электронными книгами с действующими (вычисляемыми) примерами.

В новые версии MATLAB введен также ряд средств на основе графического интерфейса пользователя (GUI — Graphic User Interface), привычного для операционных систем Windows 95/98/NT. Это панели инструментов, редактор и оглащик m-файлов, красочная демонстрация возможностей и т. д. Есть и возможность создавать свои средства пользовательского интерфейса [16, 18].

1.4. Начало работы с MATLAB R2008a

1.4.1. Запуск MATLAB и работа в режиме диалога

MATLAB обычно запускается из главного меню операционной системы Windows или активизацией ярлыка с логотипом системы на рабочем столе Windows. После запуска через некоторое время (около нескольких секунд для современных ПК) на экране появляется основное окно системы MATLAB, показанное на рис. 1.6. Оно имеет обычные средства управления размерами, скрытия и закрытия окон. Представлен вариант интерфейса, задаваемый по умолчанию (Default).

Система готова к проведению вычислений в *командном режиме*. Сеанс работы с MATLAB принято именовать *сессией* (session). Сессия, в сущности, является текущим документом, отражающим работу пользователя с системой MATLAB. В ней имеются строки ввода, вывода и сообщений об ошибках. Входящие в сессию определения переменных и функций, расположенные в рабочей области памяти, но не саму сессию, можно записать на диск (файлы формата .mat), используя команду save (Сохранить). Команда load (Загрузить) позволяет считать с диска данные рабочей области. Фрагменты сессии можно оформить в виде дневника с помощью команды diary (Дневник). Позже мы обсудим эти команды подробно.

Во всех реализациях MATLAB интерфейс пользователя является настраиваемым. Любую панель его можно вывести как в область слева от окна командного режима работы, так и поместить в любое место экрана. В меню есть позиция меню Desktop, в которой имеются многочисленные команды управления видом интерфейса. Они вполне очевидны и пользователь может воспользоваться ими для создания наиболее подходящего для себя вида интерфейса. В большинстве примеров этой книги используется упрощенный интерфейс с изображением только окна командного режима или даже только копий команд из него и результатов вычислений.

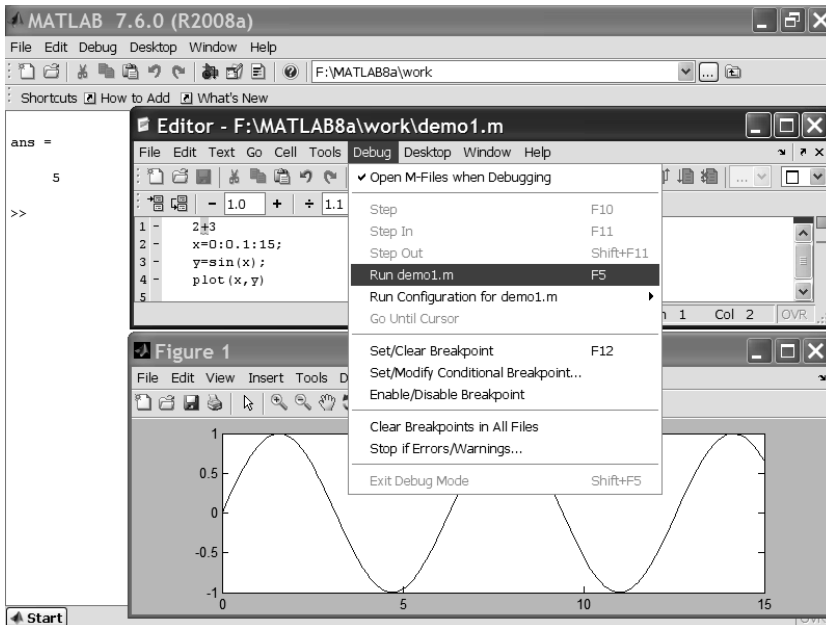


Рис. 1.6. Окно системы MATLAB R2008a с окнами редактора программ и двумерной графики

Полезно обратить внимание на возможность использования контекстного меню правой клавиши мыши в момент выделения той или иной позиции рабочего меню. Как и во всех приложениях операционных систем Windows XP/2000/NT4 это меню дает доступ ко всем мозиюжным в данный момент операциями.

Вид окон самой системы MATLAB один и тот же вне зависимости от примененной операционной системы. В связи с этим в дальнейшем мы не будем акцентировать внимание на том, в какой операционной системе используется MATLAB. Как правило, это операционная система Windows XP.

1.4.2. Классический интерфейс MATLAB

Вид окна системы по умолчанию (рис. 1.6) вполне отвечает канонам современного интерфейса Windows-приложений. Пользовательский интерфейс много-оконный и имеет ряд средств прямого доступа к различным компонентам системы. В панели инструментов имеется меню просмотра файловой системы с кнопкой его открытия. В левой части окна есть окна доступа к компонентам системы Launch Pad/Workspace (Панель Запуска/Рабочая область) и окно Current Directory (текущей папки). Под ними расположено окно Command History содержащее список выполненных команд. Щелкнув мышью по любой команде ее можно перенести в текущую строку окна командного режима MATLAB.

Надо прямо признать, что особой необходимости в новациях интерфейса нет, поскольку многие пользователи уже привыкли к крайней простоте интерфейса первых реализаций систем MATLAB и считают такой интерфейс достоинством системы. Учтя это, разработчики систем MATLAB 6.* ввели в позицию View (Вид) меню команду Desktop Layout 4 Command Windows Only (Только Командное Окно). Стоит ее исполнить, как вид окна системы будет очень напоминать добрый старый интерфейс версий MATLAB 5.* (см. рис. 1.7).

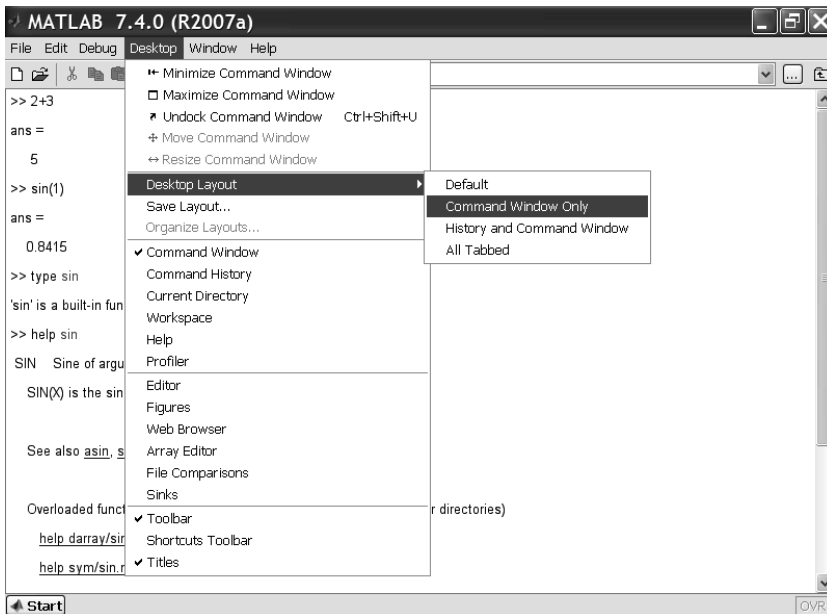


Рис. 1.7. Упрощенный интерфейс системы MATLAB MATLAB R2007a

Если вы все же хотите вкусить прелести нового интерфейса, то исполните в той же позиции меню команду Default (Интерфейс по Умолчанию). Там же вы найдете и другие возможности модификации вида интерфейса системы MATLAB 7.*.

1.4.3. MATLAB в роли мощного научного калькулятора

Система MATLAB создана таким образом, что любые (подчас весьма сложные) вычисления можно выполнять в режиме *прямых вычислений*, то есть без подготовки программы. Работа с системой при этом носит диалоговый характер и происходит по правилу: задал вопрос, получил ответ. Пользователь набирает на клавиатуре вычисляемое выражение, редактирует его (если нужно) в командной строке и завершает ввод нажатием клавиши ENTER. В качестве примера на рис. 1.7 уже были показаны простейшие вычисления.

Даже из таких простых примеров можно сделать некоторые поучительные выводы:

- сделать текущую директорию той, например `Work`, в которой хранятся используемые файлы пользователя;
- для указания ввода исходных данных используется символ `>>`;
- данные вводятся с помощью простейшего строчного редактора;
- для блокировки вывода результата вычислений некоторого выражения после него надо установить знак `;` (точка с запятой);
- если не указана переменная для значения результата вычислений, то MATLAB назначает такую переменную с именем `ans`;
- знаком присваивания является привычный математикам знак равенства `=`, а не комбинированный знак `:=`, как во многих других языках программирования и математических системах;
- встроенные функции (например, `sin`) записываются строчными буквами, и их аргументы указываются в *круглых скобках*;
- результат вычислений выводится в строках вывода (без знака `>>`);
- диалог происходит в стиле «задал вопрос — получил ответ».

В большинстве математических систем вычисление $\sin(V)$ или $\exp(V)$, где V — вектор, сопровождалось бы выдачей ошибки, поскольку функции `sin` и `exp` должны иметь аргумент в виде скалярной величины. Однако MATLAB — матричная система, а вектор является разновидностью матрицы с размером `1n` или `n1`.

Для просмотра содержимого массивов удобно использовать браузер рабочего пространства `Workspace`. Каждый вектор и матрица в нем представляются в виде квадратика с ячейками, справа от которого указывается размер массива. Двойной щелчок по квадратiku мышью ведет к появлению окна редактора массивов `Array Editor`. Работа с редактором массивов вполне очевидна, как и с командами позиции `View` меню, которая теперь дает дополнительные операции по работе с массивами — задание формата вывода массивов и вида сортировки.

Как видно из приведенных примеров, ввод исходных выражений для вычислений в системе MATLAB осуществляется в самом обычном текстовом формате. В этом же формате выдаются результаты вычислений, за исключением графических. Приведем примеры записи вычислений, выполненных системой MATLAB 7 в командной строке и размещенных в тексте книги:

Обратите внимание на форму ответов при выполнении простых операций без указания переменной, которой присваивается результат. В таких случаях MATLAB сам назначает переменную `ans`, которой присваивается результат и значение которой затем выводится на экран.

1.4.4. Перенос строки в сессии

В некоторых случаях вводимое математическое выражение может оказаться настолько длинным, что для него не хватит одной строки. В этом случае часть выражения можно перенести на новую строку с помощью знака многоточия `<...>` (3 или более точек), например:

```
s = 1 - 1/2 + 1/3 - 1/4 + 1/5 - 1/6 + 1/7 ...
1/8 + 1/9 - 1/10 + 1/11 - 1/12;
```

Максимальное число символов в одной строке командного режима — 4096, а в *m*-файле — не ограничено, но со столь длинными строками работать неудобно. В ранних версиях в одной строке было не более 256 символов.

1.4.5. Запуск примеров применения MATLAB из командной строки

MATLAB имеет множество примеров применения, часть из которых можно запускать прямо из командной строки. Например, команда

```
>> bench
```

запускает демонстрационный пример тестирования системы (рис. 1.8). Здесь ПК автора на четырехядерном микропроцессоре Pentium Core 2 Quad, занял почетное первое место.

При тестировании MATLAB R2009a тот же ПК показал второе место. На первом оказался компьютер с 64-разрядным 4-ядерным микропроцессором с операционной системой LINUX.

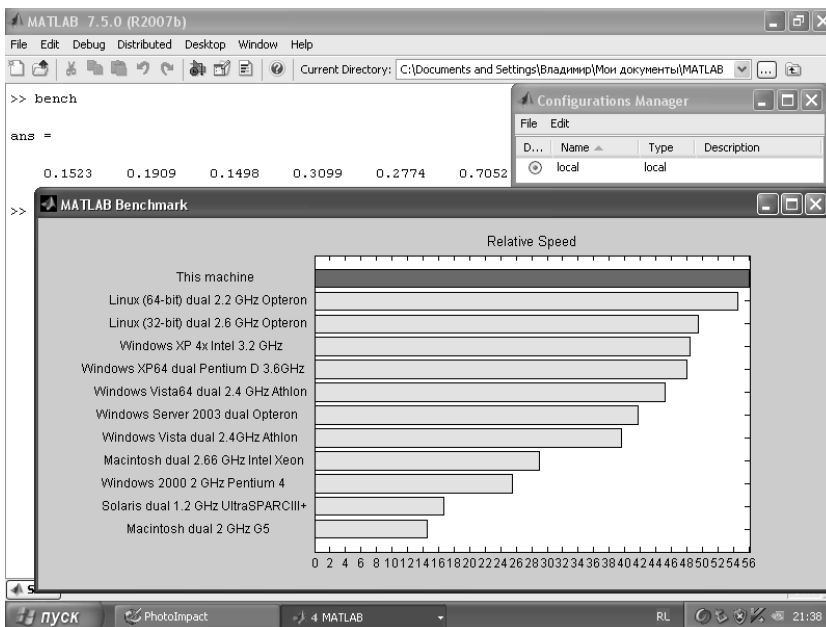


Рис. 1.8. Результаты тестирования системы MATLAB R2007a

В более ранних версиях MATLAB результаты тестирования оказались менее эффективными. Стоит учесть, что новейшие реализации MATLAB поддерживают работу в компьютерах многоядерных процессоров, дающих существенное ускорение вычислений.

1.4.6. Ввод и вычисление математических выражений

Центральным понятием всех математических систем является *математическое выражение*. Оно задает то, что должно быть вычислено в численном (реже символьном) виде. Например, для вычисления выражения $2+3$ выполняется следующим образом:

```
>> 2+3
ans =
    5
```

Здесь `>>` знак приглашения к вводу, `ans` — системная переменная, принимающая значение результата вычислений. Если поставить после выражения оператор `;` (точка с запятой) то вывод результата вычислений блокируется:

```
>> 2+3
```

Вот еще несколько примеров записи выражений:

```
2^3;
2.301*sin(x)
4+exp(3)/5
sqrt(y)/2
sin(pi/2)
```

Математические выражения строятся на основе чисел, констант, переменных, операторов, функций и разных спецзнаков. Ниже даются краткие пояснения сути этих понятий. Специфика MATLAB в том, что математические выражения задаются в виде одной строки. Например, 2^3 записывается как `2^3`.

1.5. Типы данных

1.5.1. Действительные числа и их форматы

Число — простейший объект языка MATLAB, представляющий количественные данные. Числа можно считать константами, имена которых совпадают с их значениями. Числа используются в общепринятом представлении о них. Они могут быть целыми, дробными, с фиксированной и плавающей точкой. Возможно представление чисел в хорошо известном научном формате с указанием мантиссы и порядка числа. Ниже приводятся примеры представления чисел:

```
0      2      2.301      123.456e-24      -234.456e10      и т. д.
```

Как нетрудно заметить, в мантиссе чисел целая часть отделяется от дробной не запятой, а точкой, как принято в большинстве языков программирования. Для отделения порядка числа от мантиссы используется символ `e`. Знак «плюс» у чисел не проставляется, а знак «минус» у числа называют *унарным минусом*. Пробелы между символами в числах не допускаются.