

**УДК 32.973.26-018.2**

**ББК 004.438**

**Д93**

**Д93 Дьяконов В. П.**

**MATLAB и SIMULINK для радиоинженеров. – М.: ДМК Пресс, 2016. – 976 с.: ил.**

**ISBN 978-5-97060-345-1**

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 инструментарий 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.

**УДК 32.973.26-018.2**

**ББК 004.438**

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.

**ISBN 978-5-97060-345-1**

© Дьяконов В. П.

© Оформление, издание, ДМК Пресс

# Краткое оглавление

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

# Оглавление

<b>Введение</b> .....	33
<b>Предупреждения</b> .....	40
<b>Благодарности</b> .....	41
<b>Адреса для переписки</b> .....	41
<b>Глава 1. Работа с MATLAB и SIMULINK</b> .....	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
<b>1.5. Типы данных .....</b>	<b>62</b>
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
<b>1.6. Элементы программирования с среде MATLAB .....</b>	<b>74</b>
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
<b>1.7. Операции с рабочей областью, текстом сессии и редактором m-файлов .....</b>	<b>82</b>
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
<b>1.8. Графика системы MATLAB .....</b>	<b>86</b>
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
<b>1.9. Специальные средства графики .....</b>	<b>97</b>
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>cxpair</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

<b>2.5. Функции Signal Processing для моделирования сигналов</b> .....	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
<b>2.6. Функции задания окон</b> .....	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 VWTool .....	206
<b>2.7. Изменение частоты дискретизации сигналов</b> .....	206
2.7.1. Децимация — decimate .....	206
2.7.2. Интерполяция сигналов — interp .....	208
2.7.3. Рациональное изменение частоты дискретизации — resample .....	210
<b>2.8. Модуляция и демодуляция сигналов</b> .....	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 — isscps .....	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 — pburg .....	231
2.13.4. Ковариационный метод — pscov .....	233
2.13.5. Модифицированный ковариационный метод — pmscov .....	234
2.13.6. Многооконный метод — pmtm .....	234
2.13.7. Метод Уэлча — pwelch .....	235
2.13.8. Метод собственных значений — peig .....	237
2.13.9. Метод Юла-Уокера — pyulear .....	237
2.13.10. Метод классификации множественных сигналов — pmusic .....	238
2.13.11. Вычисление частот и мощностей по алгоритму MUSIC — rootmusic .....	239
2.13.12. Сравнение спектральных оценок разными методами .....	240
2.14. Статистика сигналов .....	241
2.14.1. Оценка КМК двух сигналов — cohere .....	241
2.14.2. Взаимная СПМ двух сигналов — csd .....	242
2.14.3. Вычисление корреляционной и ковариационной матриц — corrcoef и cov .....	244
2.14.4. Взаимная корреляционная функция — xcorr и xcorr2 ...	244
2.14.5. Оценка матрицы автокорреляции — corrmatrix .....	246
2.14.6. Взаимная ковариационная функция xcov .....	246
2.15. Средства визуализации спектра сигналов .....	246
2.15.1. Построение периодограмм — periodogram .....	246
2.15.2. Построение графиков спектральной плотности .....	247
2.15.3. Построение спектрограмм — specgram .....	248
2.15.4. Применение функции дискретного Фурье-преобразования goertzel .....	252

## Глава 3. Моделирование и фильтрация

<b>сигналов</b> .....	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 — freqs .....	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 АР-модели методом Бурга — arburg .....	276
3.5.2. Другие функции расчета параметров АР-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

<b>4.4. Пакет проектирования фильтров</b>	
<b>Filter Design Toolbox .....</b>	<b>345</b>
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
<b>4.5. Основные функции пакета Filter Design Toolbox ....</b>	<b>349</b>
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
<b>4.6. Техника проектирования Q-фильтров .....</b>	<b>363</b>
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
<b>4.7. Взаимодействие с другими пакетами расширения .....</b>	<b>377</b>
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
<b>4.8. Проектирование фильтров на специализированных микросхемах .....</b>	<b>381</b>
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
<b>4.9. Пакет расширения Signal Processing Blockset .....</b>	<b>389</b>
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
<b>4.10. Примеры моделирования систем на основе пакета SPB .....</b>	<b>407</b>
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

<b>WAVELET TOOLBOX .....</b>	<b>413</b>
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 — cmorwav .....	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>wprviewcf</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>wavefun2</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>cwtext</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>cwt</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>upcoef</code> .....	520
6.2.7. Одноуровневое восстановление одномерного вейвлет-разложения — <code>upwlew</code> .....	522
6.2.8. Многоуровневое одномерное вейвлет-разложение — <code>wavedec</code> .....	522
6.2.9. Многоуровневое одномерное <code>wavelet</code> восстановление — <code>waverec</code> .....	523
6.2.10. Восстановление одиночной ветви из одномерных вейвлет-коэффициентов — <code>wrcoef</code> .....	523
<b>6.3. Средства GUI одномерного вейвлет-преобразования</b> .....	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
<b>6.4. Дискретное двумерное вейвлет-преобразование</b> .....	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>upcoef2</code> .....	540

6.4.6. Многоуровневое двумерное вейвлет-разложение — <code>wavedec2</code> .....	541
6.4.7. Одноуровневое восстановление двумерного вейвлет-разложения — <code>upwlev2</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
<b>6.5. Пакетные вейвлет-алгоритмы</b> .....	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>wprcoef</code> .....	547
6.5.7. Сечение вейвлет-пакетного дерева <code>wpcutree</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>wpfun</code> .....	550
6.5.11. Перекомпонованный пакетный вейвлет — <code>wprjoin</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
<b>6.6. Дискретное стационарное вейвлет-преобразование</b> .....	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

<b>6.7. Удаление шумов и сжатие сигналов и изображений</b>	<b>556</b>
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 порога — <code>wthresh</code>	572
6.7.19. Управление параметрами порога — <code>wthrmngr</code>	573
<b>6.8. Обзор основных применений вейвлет-технологии</b>	<b>573</b>
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
<b>6.9. Вейвлеты в пакете расширения Signal Processing Blockset .....</b>	<b>590</b>
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

<b>7.1. Пакет расширения RF Toolbox .....</b>	<b>596</b>
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
<b>7.2. Работа с примерами применения пакета RF Toolbox .....</b>	<b>606</b>
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
<b>7.3. Инструмент RFTool .....</b>	<b>616</b>
7.3.1. Открытие окна инструмента RFTtool .....	616
7.3.2. Загрузка примеров в RFTool .....	617

7.3.3. Визуализация результатов анализа с помощью RFTtool .....	618
<b>7.4. Пакет расширения RF Blockset .....</b>	<b>621</b>
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
<b>7.5. Примеры применения пакета RF Blockset .....</b>	<b>630</b>
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
<b>7.6. Пакет расширения Simscape и его библиотека .....</b>	<b>637</b>
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
<b>7.7. Примеры моделирования электронных устройств с применением пакета Simscape .....</b>	<b>642</b>
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
<b>7.8. Пакет моделирования электронных устройств SimElectronics .....</b>	<b>652</b>
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 Бode для каскада на полевом транзисторе с управляющим переходом .....	662
7.8.7. Моделирование характериографов .....	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 ..... 801**

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
<b>9.3. Пакет расширения SimPowerSystems .....</b>	<b>838</b>
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
<b>9.4. Построение уточненной модели ключа на мощном МДП-транзисторе .....</b>	<b>874</b>
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 .....**

881

<b>10.1. Работа с компьютеризированной виртуальной лабораторией .....</b>	<b>882</b>
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
<b>10.2. Современные измерительные системы .....</b>	<b>898</b>
10.2.1. Построение измерительных систем .....	898
10.2.2. Порты для подключения измерительных приборов к компьютеру .....	899
<b>10.3. Стыковка компьютера с цифровым осциллографом .....</b>	<b>901</b>
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
<b>10.4. Управление генераторами произвольных сигналов от системы MATLAB .....</b>	<b>914</b>
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
<b>10.5. Расширенная обработка в MATLAB реальных осциллограмм .....</b>	<b>919</b>
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
<b>10.6. Расширенный спектральный анализ реальных осциллограмм в MATLAB .....</b>	<b>928</b>

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
<b>10.7. Вейвлет-анализ реальных осциллограмм в MATLAB .....</b>	<b>936</b>
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
<b>10.8. Компьютерная математика в цифровых измерительных приборах .....</b>	<b>952</b>
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
<b>Список литературы .....</b>	<b>970</b>