



А. И. Солонина, Д. М. Клионский, Т. В. Меркучева, С. Н. Перов

Цифровая обработка сигналов и MATLAB



УДК 004.438
ББК 32.973.26-018.2
С60

Солонина, А. И.

С60 Цифровая обработка сигналов и MATLAB: учеб. пособие / А. И. Солонина, Д. М. Клионский, Т. В. Меркучева, С. Н. Перов. — СПб.: БХВ-Петербург, 2013. — 512 с.: ил. — (Учебная литература для вузов)

ISBN 978-5-9775-0919-0

Описываются базовые методы и алгоритмы цифровой обработки сигналов и средств их компьютерного моделирования в системе MATLAB. Даны основы алгоритмического языка MATLAB. Рассматриваются дискретные сигналы, линейные дискретные системы, дискретное преобразование Фурье с использованием алгоритмов БПФ, синтез и анализ КИХ- и БИХ-фильтров, в том числе с фиксированной точкой, спектральный анализ сигналов, многоскоростная обработка сигналов и адаптивная цифровая фильтрация. Технология обучения в процессе компьютерного моделирования на основе созданных авторами программ или графического интерфейса пользователя MATLAB расширяет теоретические знания и позволяет понять многие важные проблемы и аспекты практического применения методов и алгоритмов ЦОС. На прилагаемом CD хранятся обучающие программы и таблицы исходных данных.

*Для студентов, аспирантов и преподавателей вузов,
а также специалистов в области цифровой обработки сигналов*

УДК 004.438
ББК 32.973.26-018.2

Группа подготовки издания:

Главный редактор	<i>Екатерина Кондукова</i>
Зав. редакцией	<i>Екатерина Капалыгина</i>
Редактор	<i>Анна Кузьмина</i>
Компьютерная верстка	<i>Ольги Сергиенко</i>
Корректор	<i>Зинаида Дмитриева</i>
Дизайн серии	<i>Инны Тачиной</i>
Оформление обложки	<i>Марины Дамбиевой</i>
Фото	<i>Кирилла Сергеева</i>

РЕЦЕНЗЕНТЫ:

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

Подписано в печать 30.04.13.
Формат 70×100^{1/16}. Печать офсетная. Усл. печ. л. 41,28.
Тираж 700 экз. Заказ №
"БХВ-Петербург", 191036, Санкт-Петербург, Гончарная ул., 20.

Первая Академическая типография "Наука"
199034, Санкт-Петербург, 9 линия, 12/28

ISBN 978-5-9775-0919-0

© Солонина А. И., Клионский Д. М., Меркучева Т. В.,
Перов С. Н., 2013
© Оформление, издательство "БХВ-Петербург", 2013

Оглавление

Предисловие	9
ЧАСТЬ I. ЗНАКОМСТВО С MATLAB	13
Глава 1. Знакомство с MATLAB. Основные объекты языка MATLAB	15
1.1. Краткая теоретическая справка.....	15
1.1.1. Режим прямых вычислений.....	16
1.1.2. Базовые объекты языка MATLAB	16
1.1.3. Рабочая область памяти Workspace.....	25
1.1.4. Сохранение данных на диске	26
1.2. Содержание лабораторной работы	26
1.3. Задание на лабораторную работу.....	26
1.4. Задание на самостоятельную работу	31
1.5. Отчет и контрольные вопросы.....	32
1.6. Литература.....	33
Глава 2. Операции с матрицами.....	34
2.1. Краткая теоретическая справка.....	34
2.1.1. Функции генерации типовых матриц	36
2.1.2. Преобразование матриц.....	36
2.1.3. Поэлементные операции с матрицами	37
2.1.4. Операции с матрицами в задачах линейной алгебры.....	38
2.1.4.1. Арифметические операции с матрицами.....	38
2.1.4.2. Транспонирование и эрмитово сопряжение матриц	39
2.1.4.3. Обращение матриц.....	41
2.1.4.4. Матричное деление	41
2.1.5. Норма матрицы и вектора	42
2.1.6. Операции с матрицами в задачах математической статистики.....	43
2.2. Содержание лабораторной работы	44
2.3. Задание на лабораторную работу.....	45
2.4. Задание на самостоятельную работу	48
2.5. Отчет и контрольные вопросы.....	48
2.6. Литература.....	49
Глава 3. Типы массивов.....	50
3.1. Краткая теоретическая справка.....	50
3.1.1. Матрицы числового и логического типов.....	51
3.1.2. Матрицы символьного типа	51
3.1.3. Структуры (массивы записей).....	53
3.1.4. Массивы ячеек.....	55
3.1.5. Определение типа массива	56
3.2. Содержание лабораторной работы	56
3.3. Задание на лабораторную работу.....	56
3.4. Задание на самостоятельную работу	58
3.5. Отчет и контрольные вопросы.....	59
3.6. Литература.....	59

Глава 4. Средства графики.....	60
4.1. Краткая теоретическая справка.....	60
4.1.1. Двумерные графики.....	61
4.1.2. Управление свойствами двумерных графиков.....	61
4.1.3. Трехмерные графики.....	64
4.1.4. Управление свойствами трехмерных графиков.....	65
4.2. Содержание лабораторной работы.....	66
4.3. Задание на лабораторную работу.....	66
4.4. Задание на самостоятельную работу.....	69
4.5. Отчет и контрольные вопросы.....	70
4.6. Литература.....	71
Глава 5. Режим программирования: script-файлы и function-файлы.....	72
5.1. Краткая теоретическая справка.....	72
5.1.1. Script-файлы.....	72
5.1.2. Function-файлы.....	73
5.1.3. Оформление и вывод листинга М-файлов.....	74
5.1.4. Ввод/вывод данных.....	75
5.1.5. Пауза и досрочное прерывание программы.....	76
5.1.6. Создание и хранение М-файлов.....	77
5.2. Содержание лабораторной работы.....	78
5.3. Задание на лабораторную работу.....	78
5.4. Задание на самостоятельную работу.....	80
5.5. Отчет и контрольные вопросы.....	81
5.6. Литература.....	82
Глава 6. Режим программирования: организация разветвлений и циклов.....	83
6.1. Краткая теоретическая справка.....	83
6.1.1. Операторы организации разветвлений.....	83
6.1.2. Операторы организации циклов.....	85
6.2. Содержание лабораторной работы.....	88
6.3. Задание на лабораторную работу.....	88
6.4. Задание на самостоятельную работу.....	90
6.5. Отчет и контрольные вопросы.....	91
6.6. Литература.....	91
ЧАСТЬ II. МОДЕЛИРОВАНИЕ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ	
В MATLAB.....	93
Глава 7. Дискретные сигналы.....	95
7.1. Краткая теоретическая справка.....	95
7.1.1. Детерминированные дискретные сигналы.....	96
7.1.2. Случайные дискретные сигналы.....	97
7.2. Содержание лабораторной работы.....	101
7.3. Задание на лабораторную работу.....	101
7.4. Типовой script-файл для выполнения лабораторной работы.....	107
7.5. Задание на самостоятельную работу.....	115
7.6. Отчет и контрольные вопросы.....	118
7.7. Литература.....	119
Глава 8. Линейные дискретные системы.....	120
8.1. Краткая теоретическая справка.....	120
8.1.1. Описание ЛДС во временной области.....	121
8.1.2. Описание ЛДС в z-области.....	123
8.1.3. Описание ЛДС в частотной области.....	125
8.1.4. Структуры звеньев 2-го порядка.....	127

8.2. Содержание лабораторной работы	130
8.3. Задание на лабораторную работу	130
8.4. Типовой script-файл для выполнения лабораторной работы	134
8.4.1. Используемые внешние функции	140
8.5. Задание на самостоятельную работу	140
8.6. Отчет и контрольные вопросы	141
8.7. Литература	142

Глава 9. Дискретное преобразование Фурье (часть 1)143

9.1. Краткая теоретическая справка	143
9.1.1. Дискретное преобразование Фурье	143
9.1.2. Выделение дискретных гармоник полезного сигнала	145
9.1.3. Восстановление спектральной плотности	146
9.1.4. Восстановление аналогового сигнала	147
9.2. Содержание лабораторной работы	148
9.3. Задание на лабораторную работу	148
9.4. Типовой script-файл для выполнения лабораторной работы	153
9.4.1. Используемые внешние функции	162
9.5. Задание на самостоятельную работу	163
9.6. Отчет и контрольные вопросы	164
9.7. Литература	165

Глава 10. Дискретное преобразование Фурье (часть 2)166

10.1. Краткая теоретическая справка	166
10.1.1. Растекание спектра	166
10.1.2. Улучшение различения дискретных гармоник с близко расположенными частотами	167
10.1.3. Вычисление линейных и круговых сверток с помощью ДПФ	167
10.1.4. Вычисление секционированных сверток с помощью ДПФ	169
10.2. Содержание лабораторной работы	169
10.3. Задание на лабораторную работу	169
10.4. Типовой script-файл для выполнения лабораторной работы	175
10.4.1. Используемые внешние функции	184
10.5. Задание на самостоятельную работу	185
10.6. Отчет и контрольные вопросы	186
10.7. Литература	186

Глава 11. Синтез КИХ-фильтров методом окон.....187

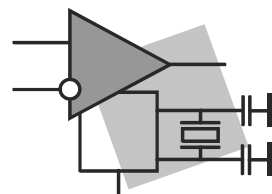
11.1. Краткая теоретическая справка	187
11.1.1. Свойства КИХ-фильтров	188
11.1.2. Задание требований к АЧХ	189
11.1.3. Структуры КИХ-фильтров	193
11.1.4. Процедура синтеза КИХ-фильтров методом окон	195
11.1.5. Синтез КИХ-фильтров методом окон в MATLAB	196
11.2. Содержание лабораторной работы	197
11.3. Задание на лабораторную работу	198
11.4. Типовой script-файл для выполнения лабораторной работы	202
11.4.1. Синтез и анализ КИХ-фильтра ФНЧ	202
11.4.2. Синтез и анализ КИХ-фильтра ФВЧ	205
11.4.3. Синтез и анализ КИХ-фильтра ПФ	208
11.4.4. Синтез и анализ КИХ-фильтра РФ	210
11.4.5. Используемые внешние функции	213
11.5. Задание на самостоятельную работу	216
11.6. Отчет и контрольные вопросы	217
11.7. Литература	218

Глава 12. Синтез КИХ-фильтров методом наилучшей равномерной (чебышевской) аппроксимации	219
12.1. Краткая теоретическая справка.....	219
12.1.1. Процедура синтеза КИХ-фильтров методом чебышевской аппроксимации	219
12.1.2. Синтез КИХ-фильтров методом чебышевской аппроксимации в MATLAB	222
12.1.3. Описание требований к характеристике затухания в виде объекта <i>fdesign</i>	223
12.1.4. Синтез КИХ-фильтров в виде объектов <i>dfilt</i> на основе объектов <i>fdesign</i>	225
12.2. Содержание лабораторной работы.....	226
12.3. Задание на лабораторную работу.....	226
12.4. Типовой script-файл для выполнения лабораторной работы.....	232
12.4.1. Синтез и анализ КИХ-фильтра ФНЧ	232
12.4.2. Синтез и анализ КИХ-фильтра ФВЧ	235
12.4.3. Синтез и анализ КИХ-фильтра ПФ	239
12.4.4. Синтез и анализ КИХ-фильтра РФ	242
12.4.5. Используемые внешние функции	245
12.5. Задание на самостоятельную работу	246
12.6. Отчет и контрольные вопросы	247
12.7. Литература.....	248
Глава 13. Синтез БИХ-фильтров методом билинейного Z-преобразования	249
13.1. Краткая теоретическая справка.....	249
13.1.1. Задание требований к характеристике затухания.....	249
13.1.2. Структуры БИХ-фильтров	250
13.1.3. Процедура синтеза БИХ-фильтров методом билинейного Z-преобразования	252
13.1.4. Синтез аналоговых фильтров в MATLAB	253
13.1.5. Синтез БИХ-фильтров методом билинейного Z-преобразования в MATLAB	253
13.1.6. Синтез БИХ-фильтров в виде объектов <i>dfilt</i> на основе объектов <i>fdesign</i>	255
13.1.7. Расстановка звеньев и масштабирование в каскадных структурах БИХ-фильтров	256
13.2. Содержание лабораторной работы.....	256
13.3. Задание на лабораторную работу.....	256
13.4. Типовой script-файл для выполнения лабораторной работы.....	261
13.4.1. Синтез и анализ БИХ-фильтра ФНЧ	261
13.4.2. Синтез и анализ БИХ-фильтра ФВЧ	266
13.4.3. Синтез и анализ БИХ-фильтра ПФ	270
13.4.4. Синтез и анализ БИХ-фильтра РФ	274
13.4.5. Используемые внешние функции	278
13.5. Задание на самостоятельную работу	279
13.6. Отчет и контрольные вопросы.....	280
13.7. Литература.....	280
Глава 14. Синтез цифровых фильтров средствами GUI FDATool и FilterBuilder	281
14.1. Краткая теоретическая справка.....	281
14.1.1. Синтез цифровых фильтров в GUI FDATool	281
14.1.2. Экспорт из GUI FDATool в Workspace.....	283
14.1.3. Синтез цифровых фильтров в FilterBuilder GUI.....	284
14.2. Содержание лабораторной работы.....	287
14.3. Задание на лабораторную работу.....	287
14.4. Задание на самостоятельную работу	297
14.5. Отчет и контрольные вопросы.....	298
14.6. Литература.....	298
Глава 15. Цифровые фильтры с фиксированной точкой.....	299
15.1. Краткая теоретическая справка.....	299
15.1.1. Эффекты квантования в структуре ЦФ с ФТ	300
15.1.2. Моделирование структуры исходного ЦФ в GUI FDATool	301

15.1.3. Моделирование структуры ЦФ с ФТ в GUI FDATool.....	301
15.1.3.1. Установка свойств ЦФ с ФТ на вкладке <i>Coefficients</i>	303
15.1.3.2. Установка свойств ЦФ с ФТ на вкладке <i>Input/Output</i>	305
15.1.3.3. Установка свойств ЦФ с ФТ на вкладке <i>Filter Internals</i>	309
15.1.4. Моделирование структуры ЦФ с ФТ в FilterBuilder GUI	313
15.2. Содержание лабораторной работы.....	316
15.3. Задание на лабораторную работу.....	317
15.4. Задание на самостоятельную работу	322
15.5. Отчет и контрольные вопросы.....	322
15.6. Литература.....	323
Глава 16. Спектральный анализ: непараметрические методы.....	324
16.1. Краткая теоретическая справка.....	324
16.1.1. Метод периодограмм.....	325
16.1.2. Основные показатели качества оценок СПМ	328
16.1.3. Метод периодограмм Даньелла	330
16.1.4. Метод периодограмм Бартлетта	332
16.1.5. Метод периодограмм Уэлча.....	333
16.1.6. Метод Блэкмана—Тьюки	334
16.1.7. Моделирование случайной последовательности с требуемой АКФ.....	337
16.1.8. Основные параметры окон	339
16.1.9. Спектрограмма	339
16.2. Содержание лабораторной работы.....	340
16.3. Задание на лабораторную работу.....	340
16.4. Типовой script-файл для выполнения лабораторной работы.....	346
16.5. Задание на самостоятельную работу	355
16.6. Отчет и контрольные вопросы.....	356
16.7. Литература.....	357
Глава 17. Спектральный анализ: параметрические методы.....	358
17.1. Краткая теоретическая справка.....	358
17.1.1. APCC-, AP- и CC-модели	359
17.1.2. Метод Юла—Уолкера (автокорреляционный) оценки параметров AP-модели.....	361
17.1.3. Методы оценки параметров AP-модели.....	364
17.1.4. Методы оценки СПМ.....	366
17.1.5. Оценка порядка AP-модели.....	367
17.1.6. Сравнение оценок СПМ с истинной СПМ.....	368
17.2. Содержание лабораторной работы.....	368
17.3. Задание на лабораторную работу.....	369
17.4. Типовой script-файл для выполнения лабораторной работы.....	373
17.5. Задание на самостоятельную работу	380
17.6. Отчет и контрольные вопросы.....	381
17.7. Литература.....	382
Глава 18. Спектральный анализ средствами GUI SPTool.....	383
18.1. Краткая теоретическая справка.....	383
18.1.1. Обращение к GUI SPTool	383
18.1.2. Сигналы: группа <i>Signals</i>	384
18.1.3. Моделирование системы цифровой фильтрации: группа <i>Filters</i>	387
18.1.4. Спектральный анализ: группа <i>Spectra</i>	389
18.1.5. Экспорт данных из GUI SPTool	391
18.2. Содержание лабораторной работы.....	392
18.3. Задание на лабораторную работу.....	392
18.4. Задание на самостоятельную работу	397
18.5. Отчет и контрольные вопросы.....	399
18.6. Литература.....	400

Глава 19. Многоскоростные системы ЦОС	401
19.1. Краткая теоретическая справка.....	401
19.1.1. Система однократной интерполяции	402
19.1.2. Система однократной децимации.....	406
19.1.3. Система однократной передискретизации.....	409
19.1.4. Полифазные структуры многоскоростных систем.....	410
19.2. Содержание лабораторной работы.....	415
19.3. Задание на лабораторную работу.....	415
19.4. Типовой script-файл для выполнения лабораторной работы.....	421
19.5. Задание на самостоятельную работу	431
19.6. Отчет и контрольные вопросы.....	433
19.7. Литература.....	434
Глава 20. Моделирование полифазных структур многоскоростных систем средствами GUI FDATATool и FilterBuilder	435
20.1. Краткая теоретическая справка.....	435
20.1.1. Моделирование полифазных структур в GUI FDATATool.....	435
20.1.2. Моделирование полифазных структур в FilterBuilder GUI	440
20.1.3. Моделирование многоскоростных систем с полифазными структурами.....	441
20.2. Содержание лабораторной работы.....	441
20.3. Задание на лабораторную работу.....	441
20.4. Типовой script-файл для выполнения лабораторной работы.....	448
20.4.1. Система однократной интерполяции с полифазной структурой	449
20.4.2. Система однократной децимации с полифазной структурой.....	450
20.4.3. Система однократной передискретизации с полифазной структурой при повышении частоты дискретизации.....	452
20.4.4. Система однократной передискретизации с полифазной структурой при понижении частоты дискретизации	454
20.5. Задание на самостоятельную работу	456
20.6. Отчет и контрольные вопросы.....	456
20.7. Литература.....	457
Глава 21. Адаптивные фильтры.....	458
21.1. Краткая теоретическая справка.....	458
21.1.1. Фильтр Винера	460
21.1.2. Алгоритм LMS	463
21.1.3. Алгоритм RLS	467
21.1.4. Применение адаптивных фильтров	472
21.1.4.1. Идентификация систем.....	472
21.1.4.2. Оценка импульсной характеристики неизвестной системы	474
21.1.4.3. Очистка сигнала от шума	475
21.1.4.4. Выравнивание частотной характеристики неизвестной системы	477
21.2.4.5. Оценка параметров линейного предсказания сигнала	481
21.2. Содержание лабораторной работы.....	483
21.3. Задание на лабораторную работу.....	483
21.4. Типовой script-файл для выполнения лабораторной работы.....	491
21.5. Задание на самостоятельную работу	501
21.6. Отчет и контрольные вопросы.....	503
21.7. Литература.....	504
Список сокращений на английском языке	505
Список сокращений на русском языке	506
Предметный указатель.....	508

ГЛАВА 1



Знакомство с MATLAB. Основные объекты языка MATLAB

Цель работы: познакомиться с назначением и интерфейсом системы MATLAB и овладеть начальными навыками работы в режиме прямых вычислений.

1.1. Краткая теоретическая справка

Система MATLAB — это интерактивная система, предназначенная для компьютерного моделирования практически в любой области науки и техники.

Интерфейс MATLAB образуют следующие окна.

- ❑ **Command Window** (Командное окно) — основное окно интерактивной системы MATLAB с активизированной командной строкой.

Из активизированной командной строки пользователь может возвращаться к предыдущим строкам с помощью клавиш $\langle \uparrow \rangle$ и $\langle \downarrow \rangle$.

Сеанс работы в окне **Command Window** до выхода из MATLAB называют *текущей сессией*.

- ❑ **Current Folder** (Текущая папка) — в этом окне выводится содержимое папки, имя которой отображается в раскрывающемся списке **Current Folder** на панели инструментов окна MATLAB.

В составе ранних версий MATLAB (до 2009 г.) содержалась автоматически создаваемая текущая папка со стандартным именем¹ `work`, предназначенная для хранения файлов и папок, создаваемых пользователем. В последующих версиях такая папка отсутствует. Для тех же целей предусмотрена папка `MATLAB`, автоматически создаваемая в папке **Мои документы** на рабочем столе.

Создание собственной папки в окне **Current Folder** выполняется с помощью контекстного меню по команде **New Folder** (Новая папка), и новой папке присваивается имя.

¹ Здесь и далее во избежание путаницы для папок и файлов MATLAB используется шрифт Courier New.

Сохранение пути к собственной папке в окне **Current Folder** выполняется по команде контекстного меню **Add to Path | Selected Folders** (Добавить к пути | Выделенные папки).

- ☐ **Workspace** (Рабочая область памяти) — в этом окне выводится список текущих переменных, сохраняемых в рабочей области памяти **Workspace** до выхода из **MATLAB**.
- ☐ **Command History** (История команд) — в этом окне выводится построчный список объектов языка **MATLAB**, вводимых в ходе текущей и предшествующих сессий. Двойным щелчком левой кнопки мыши можно дублировать любую строку из окна **Command History** в окно **Command Window**.

Пользователь может произвольно менять состав активных окон с помощью команд меню **Desktop** (Стол).

Система оперативной помощи **MATLAB** включает в себя:

- ☐ справочную систему в формате HTML (HyperText Markup Language — язык гипертекстовой разметки), обращение к которой производится по команде **Product Help** (Помощь по продукту) в меню **Help** окна **MATLAB**;
- ☐ команду:
`help <стандартное имя объекта языка MATLAB>`

1.1.1. Режим прямых вычислений

Режим прямых вычислений (называемый также командным режимом) означает, что вычисления выполняются без составления программы. Объекты языка **MATLAB** в ходе текущей сессии вводятся построчно в командной строке окна **Command Window** с соблюдением следующих правил:

- ☐ символ ";" (точка с запятой) в конце строки *блокирует автоматический вывод* результата;
- ☐ символ "..." (многоточие) в конце строки является признаком продолжения предыдущей строки;
- ☐ символ "%" (процент) в начале строки соответствует *комментарию*.

1.1.2. Базовые объекты языка MATLAB

К базовым объектам языка **MATLAB** относятся:

- ☐ команды;
- ☐ операторы;
- ☐ константы;
- ☐ переменные;
- ☐ функции;
- ☐ выражения.

Команда — это объект языка MATLAB со стандартным именем, предназначенный для взаимодействия с системой MATLAB и имеющий формат:

<команда> <содержательная часть>

где <команда> — стандартное имя команды; <содержательная часть> — уточняется для каждой конкретной команды и может отсутствовать.

В конце команды символ ";" не ставится.

Список команд общего назначения выводится по команде:

help general

Наиболее распространенные команды приведены в табл. 1.1. Другие будут рассматриваться по мере изложения материала.

Таблица 1.1. Команды

Команда	Назначение
clc	Очистка окна Command Window
clear	Удаление объектов из Workspace (без содержательной части — очистка Workspace)
format	Установка формата вывода данных (см. табл. 1.2)
help	Справка по стандартному объекту MATLAB
load	Загрузка файла с диска в Workspace (см. разд. 1.1.4)
save	Сохранение на диске объекта Workspace (см. разд. 1.1.4)
ver	Вывод информации об установленной версии MATLAB и пакетах расширения
what	Вывод содержимого папки (без содержательной части — текущей папки), например: what work\LAB\lab_01
which	Вывод пути для нахождения встроенной или внешней функции
who	Вывод содержимого Workspace
whos	Вывод содержимого Workspace с дополнительными сведениями

Оператор — это объект языка MATLAB со стандартным именем, предназначенный для разработки программ.

Простейшим оператором является *оператор присваивания* с форматом:

<имя переменной> = <выражение>

или

<выражение>

В последнем случае значение выражения присваивается переменной со стандартным именем **ans**.

Константа — это объект языка MATLAB, имеющий в процессе вычислений неизменное значение.

Различают следующие типы констант:

☐ численные, среди которых выделяют:

- целые;
- вещественные;
- комплексные;

☐ логические;

☐ символьные.

Целые и вещественные константы могут вводиться в обычной форме с разделением *точкой* целой и дробной частей:

```
>> 158;  
>> -17.38;
```

или в форме E, которой соответствует представление числа в показательной форме:

$$\mu \cdot 10^p, \quad (1.1)$$

где μ — мантисса — вещественная константа; p — порядок — целая константа; 10 — основание, обозначаемое буквой e:

```
>> 0.157e-3;  
>> 12.23e8;
```

Комплексные константы вводятся в алгебраической форме:

$$\xi + j\eta. \quad (1.2)$$

Мнимая единица вводится как *i* или *j*, но выводится всегда как *i*:

```
>> 5+3.7j  
ans =  
5.0000 + 3.7000i
```

Возможен ввод с использованием символа умножения в мнимой части:

```
>> 5+3.7*j  
ans =  
5.0000 + 3.7000i
```

Вещественная и/или мнимая части комплексного числа могут вводиться в форме E:

```
>> 5e-3+3.7e5j  
ans =  
5.0000e-003 +3.7000e+005i
```

Комплексно сопряженная константа вводится с помощью символа "'" (апостроф):

```
>> (5+3i)'  
ans =  
5.0000 - 3.0000i
```

Вывод численных констант может производиться по умолчанию или в заданном формате с помощью команды:

```
format <вид формата>
```

где содержательная часть может отсутствовать.

Действие команды `format` сохраняется до ее отмены другой командой `format`.

Разновидности форматов можно вывести по команде:

```
help format
```

Наиболее распространенные форматы приведены в табл. 1.2.

Таблица 1.2. Форматы для вывода констант

Команда	Формат вывода
<code>format</code>	Формат, тождественный формату <code>format short</code>
<code>format short</code>	Формат с автоматическим выводом в обычной форме или нормализованной форме E с 4-мя значащими цифрами в дробной части мантиссы. Этот формат установлен по умолчанию
<code>format short e</code>	Короткий формат E с выводом в нормализованной форме E с 4-мя значащими цифрами в дробной части мантиссы
<code>format long</code>	Длинный формат с автоматическим выводом в обычной форме или нормализованной форме E с 15-ю значащими цифрами в дробной части мантиссы
<code>format long e</code>	Длинный формат с выводом в нормализованной форме E с 15-ю значащими цифрами в дробной части мантиссы

Форму E называют *нормализованной* (см. табл. 1.2), если целая часть мантиссы μ в (1.1) содержит одну отличную от нуля значащую цифру, а порядок p — три цифры.

Стандартные константы — это константы со стандартными именами. Их полный список может быть выведен по команде:

```
help elmat
```

Наиболее распространенные стандартные константы приведены в табл. 1.3.

Таблица 1.3. Стандартные константы

Стандартное имя константы	Назначение
<code>i</code> или <code>j</code>	Мнимая единица, соответствующая $\sqrt{-1}$: <code>i = sqrt(-1)</code>
<code>pi</code>	Число π

Таблица 1.3 (окончание)

Стандартное имя константы	Назначение
Inf (или inf)	Машинная бесконечность (число, большее максимально допустимого во внутренних вычислениях в MATLAB)
Nan	Не число (Not-a-number). Присваивается неопределенностям типа $0/0$, inf/inf , $0 \cdot \text{inf}$

Логические константы — это константы, принимающие значения 1 (*true* — истина) или 0 (*false* — ложь).

Символьные константы — это любые последовательности символов, заключенные в апострофы:

```
>> 'Sella'
ans =
Sella
```

Переменная — это объект языка MATLAB, который в процессе вычислений может менять свое значение.

Различают следующие типы переменных:

- ☐ простые переменные;
- ☐ массивы.

Переменные представляются своими именами (идентификаторами).

Имя переменной составляется из последовательности латинских букв, цифр и символа подчеркивания и начинается с буквы. В MATLAB *прописные и строчные буквы различаются*.

Массивом называют упорядоченную совокупность данных, объединенных одним именем.

Массив характеризуется:

- ☐ *размерностью*. Размерность массива равна количеству индексов k , которые указывают на упорядоченность данных в k -мерном пространстве.

Если данные упорядочены в строку (столбец), то их порядок следования указывается с помощью одного индекса, и массив называют одномерным или *вектором*.

Если данные упорядочены одновременно по строкам и по столбцам, то их порядок следования указывается с помощью двух индексов, и массив называют двумерным или *матрицей*.

Если данные упорядочены по матрицам, то их порядок следования указывается с помощью третьего индекса, и массив называют *трехмерным* и т. д.;

- ❑ *размером*. В матричной алгебре размер массива принято указывать произведением числа элементов по каждому индексу, а именно: $1 \times n$ — одномерный массив (вектор-строка); $m \times n$ — двумерный и т. д.

Матрицу называют *квадратной* порядка n , если число строк равно числу столбцов: $m = n$;

- ❑ *типом*. Тип массива определяется типом его элементов. Элементами числового массива являются численные константы. Основные типы массивов рассматриваются в гл. 3.

Особенностью MATLAB является то, что *тип переменной не объявляется, и любая переменная по умолчанию считается матрицей*¹.

В MATLAB *нижняя граница* индексов массива равна *единице*.

Матрица вводится построчно в квадратных скобках, элементы строки отделяются пробелом или запятой, а строки — точкой с запятой:

```
>> A = [1 2 3;5 6 7;8 9 7]
A =
     1     2     3
     5     6     7
     8     9     7
```

Вектор (вектор-строка) размером $1 \times n$ вводится в квадратных скобках, а его элементы — через пробел или запятую:

```
>> A = [1 4 5 7 8]
A =
     1     4     5     7     8
```

Вектор-столбец размером $m \times 1$ вводится в квадратных скобках, а его элементы — через точку с запятой:

```
>> A = [1;4;5]
A =
     1
     4
     5
```

Скаляр размером 1×1 можно вводить без квадратных скобок:

```
>> b = 1.5e-3;
```

Простой переменной, таким образом, соответствует скаляр.

Функции в MATLAB представлены двумя разновидностями:

- ❑ *встроенные*;
- ❑ *внешние*.

Встроенная функция (по умолчанию функция) — это объект языка MATLAB со стандартным именем, предназначенный для выполнения действий с параметра-

¹ Отсюда и название MATLAB — MATrix LABoratory (Матричная лаборатория).

ми (аргументами), перечисленными через запятую и заключенными в круглые скобки.

Список основных элементарных математических функций, сгруппированных по назначению, представлен в табл. 1.4. Их полный список выводится по команде:

`help elfun`

Таблица 1.4. Элементарные математические функции

Тип функции	Функция	Назначение
Тригонометрическая	<code>sin(X)</code>	Синус — $\sin(x)$
	<code>cos(X)</code>	Косинус — $\cos(x)$
	<code>tan(X)</code>	Тангенс — $\operatorname{tg}(x)$
	<code>cot(X)</code>	Котангенс — $\operatorname{ctg}(x)$
Обратная тригонометрическая	<code>asin(X)</code>	Арксинус — $\arcsin(x)$
	<code>acos(X)</code>	Арккосинус — $\arccos(x)$
	<code>atan(X)</code>	Арктангенс — $\operatorname{arctg}(x)$
	<code>acot(X)</code>	Арккотангенс — $\operatorname{arcctg}(x)$
Экспоненциальная	<code>exp(X)</code>	Экспонента — e^x
	<code>pow2(X)</code>	Возведение двойки в степень — 2^x
	<code>nextpow2(X)</code>	Ближайшая степень двойки в сторону увеличения — $\operatorname{int}[\log_2(x)]$
Логарифмическая	<code>log(X)</code>	Натуральный логарифм — $\ln(x)$
	<code>log10(X)</code>	Десятичный логарифм — $\lg(x)$
	<code>log2(X)</code>	Логарифм по основанию 2 — $\log_2 x$
Корень квадратный	<code>sqrt(X)</code>	Корень квадратный $\sqrt{x}$
Число по модулю m	<code>mod(X,m)</code>	Число x по модулю m — $\operatorname{mod}_m x$
С комплексным аргументом	<code>abs(X)</code>	Модуль числа $ x $
	<code>angle(X)</code>	Аргумент числа x
	<code>complex(X1,X2)</code>	Запись комплексного числа по вещественной x_1 и мнимой x_2 частям
	<code>real(X)</code>	Выделение вещественной части — $\operatorname{Re}(x)$
	<code>imag(X)</code>	Выделение мнимой части — $\operatorname{Im}(x)$
	<code>conj(X)</code>	Комплексно сопряженное число

Таблица 1.4 (окончание)

Тип функции	Функция	Назначение
Округление	fix (X)	Округление в направлении нуля — усечение дробной части
	floor (X)	Округление в направлении $-\infty$ — округление до ближайшего целого в сторону уменьшения
	ceil (X)	Округление в направлении $+\infty$ — округление до ближайшего целого в сторону увеличения
	round (X)	Округление до ближайшего целого — при дробной части, равной 0.5, — в сторону увеличения модуля числа
	nearest (X)	Округление до ближайшего целого — при дробной части, равной 0.5, — в сторону увеличения
	convergent (X)	Округление до ближайшего целого — при дробной части, равной 0.5, — в сторону ближайшего четного числа

Список основных функций преобразования систем счисления представлен в табл. 1.5. Цифра 2 в имени этих функций соответствует английскому предлогу "to", переводимому как "в" или "к".

Таблица 1.5. Функции преобразования систем счисления

Функция	Назначение
dec2hex (X)	Преобразование десятичного целого в шестнадцатеричное. Десятичное число указывается в качестве аргумента, а шестнадцатеричное выводится без апострофов с использованием заглавных букв
dec2bin (X)	Преобразование десятичного целого в двоичное. Десятичное число указывается в качестве аргумента, а двоичное выводится без апострофов
bin2dec (X)	Преобразование двоичного целого в десятичное. Двоичное число указывается в качестве аргумента в апострофах, а десятичное выводится без апострофов
hex2dec (X)	Преобразование шестнадцатеричного целого в десятичное. Шестнадцатеричное число указывается в качестве аргумента в апострофах с использованием заглавных или строчных букв, а десятичное выводится без апострофов

Выражение — это объект языка MATLAB, представляющий собой имеющую смысл совокупность констант, переменных и функций, объединенных символами операций.

К основным типам выражений относятся арифметические и логические выражения.

Арифметическим выражением называют имеющую математический смысл совокупность констант, переменных и функций, объединенных символами (или функциями) арифметических операций:

```
>> x+sin(a)-sqrt(c+b);
```

Приоритет операций в арифметических выражениях устанавливается с помощью круглых скобок и старшинства операций внутри них, а именно: сначала вычисляются функции, затем возведение в степень, затем умножение и деление и в заключение — сложение и вычитание. Операции одного ранга выполняются слева направо.

Логическим выражением называют имеющую математический смысл совокупность арифметических выражений, объединенных символами (или функциями) операций отношения и логических операций:

```
>> (i==j) & ((a+b)>sqrt(c));
```

Простейшим логическим выражением является *отношение*. Результатом вычисления логического выражения будет логическая константа 1 (true) или 0 (false):

```
>> sin(3)<0.5  
ans =  
1
```

Приоритет операций в логических выражениях устанавливается с помощью круглых скобок и старшинства операций внутри них, а именно: сначала вычисляются арифметические выражения, затем выполняются операции отношения и в заключение — логические операции. Операции одного ранга выполняются слева направо.

Символ операции — это символическое обозначение операции с операндами или операндом (объектами, с которыми выполняется операция).

Функция операции — это эквивалентное обозначение символа операции в виде функции MATLAB.

Большинство символов операций дублируется эквивалентными функциями, однако некоторые операции обозначаются только символом, другие — только функцией.

Основные символы и дублирующие их функции операции, сгруппированные по назначению, представлены в табл. 1.6—1.8, где переменные x и y — числовые матрицы, а c — скаляр.

Полный список символов и функций операций выводится по команде:

```
help ops
```

Таблица 1.6. Символы и функции арифметических операций

Символ	Функция	Операция
+	<code>plus(X,Y)</code>	Сложение матричное и поэлементное
-	<code>minus(X,Y)</code>	Вычитание матричное и поэлементное
*	<code>mtimes(X,Y)</code>	Матричное умножение
.*	<code>times(X,Y)</code>	Поэлементное умножение
^	<code>mpower(X,c)</code>	Матричное возведение в целую степень
.^	<code>power(X,c)</code>	Поэлементное возведение в степень
\	<code>mldivide(X,Y)</code>	Левое матричное деление
/	<code>mrdivide(X,Y)</code>	Правое матричное деление
.\	<code>ldivide(X,Y)</code>	Левое поэлементное деление
./	<code>rdivide(X,Y)</code>	Правое поэлементное деление

Таблица 1.7. Символы и функции операций отношения

Символ	Функция	Операция
==	<code>eq(X,Y)</code>	Равно
~=	<code>ne(X,Y)</code>	Не равно
<	<code>lt(X,Y)</code>	Меньше
>	<code>gt(X,Y)</code>	Больше
<=	<code>le(X,Y)</code>	Меньше либо равно
>=	<code>ge(X,Y)</code>	Больше либо равно

Таблица 1.8. Символы и функции логических операций

Символ	Функция	Операция
&	<code>and(X,Y)</code>	И (AND) — истина (<code>true</code> — логическая константа 1), если <i>оба</i> аргумента — истина
	<code>or(X,Y)</code>	ИЛИ (OR) — истина, если <i>хотя бы один</i> аргумент — истина
~	<code>not(X)</code>	НЕ (NOT) — ложь (<code>false</code> — логическая константа 0), если аргумент — истина, и наоборот

1.1.3. Рабочая область памяти **Workspace**

В MATLAB переменные текущей сессии хранятся в рабочей области памяти, называемой **Workspace**. Окно **Workspace**, открываемое по одноименной команде

в меню **Desktop**, содержит построчный список имен переменных (**Name**), каждую с ее символическим изображением и значением (**Value**) или размером и типом.

Двойной щелчок левой кнопки мыши на переменной в столбце **Name** или **Value** открывает окно **Variable Editor** (Редактор переменной), в котором наглядно отображается переменная и допускается ее редактирование.

1.1.4. Сохранение данных на диске

Для того чтобы в следующих сессиях воспользоваться данными текущей сессии, их можно сохранить на диске в файле с расширением `mat` по команде:

```
save <имя файла> <список переменных>
```

где:

`<имя файла>` — имя `mat`-файла; если оно не указано, то по умолчанию `mat`-файлу присваивается имя *первой* переменной из `<списка переменных>`, а сама первая переменная при этом не сохраняется; `<список переменных>` — список сохраняемых переменных, указываемых через пробел.

Данные — `mat`-файлы — по умолчанию сохраняются на диске в текущей папке. Например:

```
>> n = 1:100; x = sin(0.5*pi.*n); y = cos(0.5*pi.*n);  
>> save sigx n x y
```

Значения переменных `n`, `x`, `y` будут сохранены в файле `sigx.mat` в текущей папке.

По команде:

```
load <имя файла>
```

выполняется обратная процедура — загрузка данных (`mat`-файла) с диска в рабочее пространство памяти `Workspace`, например:

```
>> load sigx
```

Для систематизации сохраняемых файлов с различным назначением и расширением удобно создавать собственные папки.

1.2. Содержание лабораторной работы

Содержание работы связано с изучением режима прямых вычислений и базовых объектов языка MATLAB.

1.3. Задание на лабораторную работу

Задание на лабораторную работу включает в себя следующие пункты:

1. Запуск системы MATLAB и знакомство с ее интерфейсом.

Пояснить, какие окна образуют интерфейс MATLAB.