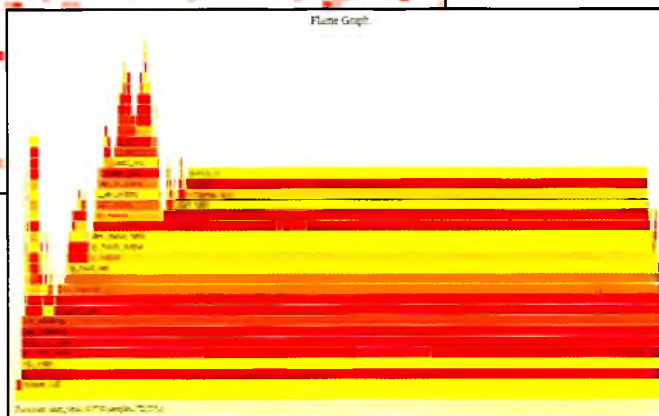
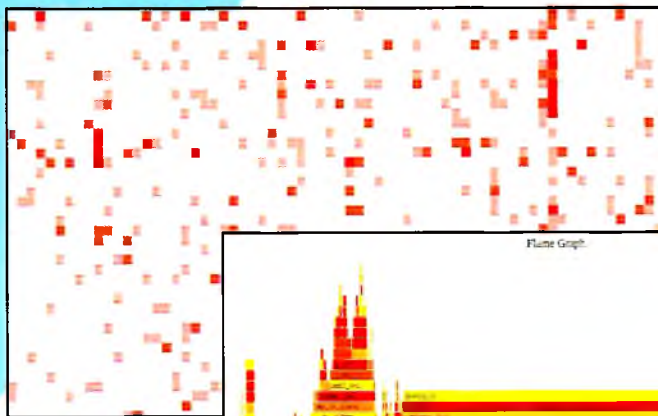


Производительность систем

Второе издание

на примере Linux

Брендан Грегг



ADDISON-WESLEY PROFESSIONAL COMPUTING SERIES



КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	30
Благодарности	38
Об авторе	41
Глава 1. Введение	42
Глава 2. Методологии	66
Глава 3. Операционные системы	146
Глава 4. Инструменты наблюдения	195
Глава 5. Приложения	241
Глава 6. Процессоры	299
Глава 7. Память	396
Глава 8. Файловые системы	460
Глава 9. Диски	533
Глава 10. Сеть	622
Глава 11. Облачные вычисления	714
Глава 12. Бенчмаркинг	786
Глава 13. perf	821
Глава 14. Ftrace	857

Глава 15. BPF	904
Глава 16. Пример из практики	939
Приложение А. Метод USE: Linux	950
Приложение В. Краткий справочник по sar	957
Приложение С. Однострочные сценарии для bpftrace	959
Приложение D. Решения некоторых упражнений	966
Приложение Е. Производительность систем, кто есть кто	969
Глоссарий	974

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	30
Об этом издании.....	30
Об этой книге	31
Благодарности.....	38
Об авторе	41
От издательства	41
Глава 1. Введение	42
1.1. Производительность системы.....	42
1.2. Роли.....	43
1.3. Действия.....	44
1.4. Перспективы	46
1.5. Сложности оценки производительности	46
1.5.1. Субъективность	47
1.5.2. Сложность.....	47
1.5.3. Множественные причины	48
1.5.4. Множественные проблемы с производительностью	48
1.6. Задержка.....	49
1.7. Наблюдаемость	50
1.7.1. Счетчики, статистики и метрики.....	50
1.7.2. Профилирование.....	52
1.7.3. Трассировка	54
1.8. Эксперименты	56
1.9. Облачные вычисления	58
1.10. Методологии.....	58
1.10.1. Анализ производительности Linux за 60 секунд.....	59

1.11. Практические примеры.....	60
1.11.1. Медленные диски.....	60
1.11.2. Изменение в программном обеспечении	63
1.11.3. Дополнительное чтение.....	65
1.12. Ссылки.....	65
Глава 2. Методологии.....	66
2.1. Терминология	67
2.2. Модели	68
2.2.1. Тестируемая система	68
2.2.2. Система массового обслуживания	69
2.3. Основные понятия.....	69
2.3.1. Задержка.....	70
2.3.2. Шкалы времени	71
2.3.3. Компромиссы	72
2.3.4. Настройка производительности	73
2.3.5. Целесообразность.....	74
2.3.6. Когда лучше остановить анализ.....	75
2.3.7. Рекомендации действительно на данный момент времени.....	76
2.3.8. Нагрузка и архитектура	77
2.3.9. Масштабируемость.....	78
2.3.10. Метрики	80
2.3.11. Потребление.....	81
2.3.12. Насыщенность.....	82
2.3.13. Профилирование.....	83
2.3.14. Кэширование	83
2.3.15. Известные неизвестные	86
2.4. Точки зрения	86
2.4.1. Анализ ресурсов.....	86
2.4.2. Анализ рабочей нагрузки.....	88
2.5. Методология	89
2.5.1. Антиметодология «Уличный фонарь»	91
2.5.2. Антиметодология «Случайное изменение»	92
2.5.3. Антиметодология «Виноват кто-то другой».....	92

2.5.4. Специальный чек-лист	93
2.5.5. Формулировка проблемы	94
2.5.6. Научный метод	94
2.5.7. Цикл диагностики	96
2.5.8. Метод инструментов	96
2.5.9. Метод USE	97
2.5.10. Метод RED	105
2.5.11. Определение характеристик рабочей нагрузки	105
2.5.12. Анализ с увеличением детализации	107
2.5.13. Анализ задержек	109
2.5.14. Метод R	109
2.5.15. Трассировка событий	110
2.5.16. Базовые статистики	112
2.5.17. Статическая настройка производительности	113
2.5.18. Настройка кэширования	113
2.5.19. Микробенчмаркинг производительности	114
2.5.20. Мантры производительности	115
2.6. Моделирование	116
2.6.1. Корпоративные и облачные среды	117
2.6.2. Визуальная идентификация	117
2.6.3. Закон Амдала	119
2.6.4. Универсальный закон масштабируемости	120
2.6.5. Теория массового обслуживания	121
2.7. Планирование емкости	125
2.7.1. Пределы ресурсов	125
2.7.2. Факторный анализ	127
2.7.3. Решения масштабирования	128
2.8. Статистики	129
2.8.1. Количественная оценка прироста производительности	129
2.8.2. Усреднение	131
2.8.3. Стандартное отклонение, процентиля, медиана	132
2.8.4. Коэффициент вариации	133
2.8.5. Мультимодальные распределения	133
2.8.6. Выбросы	134

2.9. Мониторинг.....	135
2.9.1. Временные закономерности	135
2.9.2. Инструменты мониторинга	137
2.9.3. Сводная статистика, накопленная с момента загрузки	137
2.10. Визуализация	137
2.10.1. Линейная диаграмма.....	137
2.10.2. Диаграммы рассеяния	139
2.10.3. Тепловые карты.....	140
2.10.4. Временная шкала	141
2.10.5. График поверхности.....	142
2.10.6. Инструменты визуализации	143
2.11. Упражнения.....	144
2.12. Ссылки.....	144
Глава 3. Операционные системы.....	146
3.1. Терминология	147
3.2. Основы	148
3.2.1. Ядро.....	148
3.2.2. Ядро и пользовательские режимы.....	150
3.2.3. Системные вызовы.....	152
3.2.4. Прерывания.....	154
3.2.5. Часы и бездействие	158
3.2.6. Процессы	159
3.2.7. Стеки.....	162
3.2.8. Виртуальная память	164
3.2.9. Планировщики.....	165
3.2.10. Файловая система.....	167
3.2.11. Кэширование	169
3.2.12. Сеть	170
3.2.13. Драйверы устройств.....	171
3.2.14. Многопроцессорность	171
3.2.15. Вытеснение.....	172
3.2.16. Управление ресурсами	172
3.2.17. Наблюдаемость.....	173

3.3. Ядра	173
3.3.1. Unix	174
3.3.2. BSD	175
3.3.3. Solaris	176
3.4. Linux	177
3.4.1. Новые разработки в ядре Linux	178
3.4.2. systemd	184
3.4.3. KPTI (Meltdown)	185
3.4.4. Расширенный BPF	186
3.5. Другие темы	187
3.5.1. Ядра PGO	187
3.5.2. Одноцелевые ядра	188
3.5.3. Микроядра и гибридные ядра	188
3.5.4. Распределенные операционные системы	189
3.6. Сравнение ядер	189
3.7. Упражнения	190
3.8. Ссылки	191
3.8.1. Дополнительное чтение	193
Глава 4. Инструменты наблюдения	195
4.1. Покрытие инструментами	196
4.1.1. Инструменты статического анализа производительности	197
4.1.2. Инструменты анализа кризисных ситуаций	198
4.2. Типы инструментов	199
4.2.1. Фиксированные счетчики	200
4.2.2. Профилирование	202
4.2.3. Трассировка	203
4.2.4. Мониторинг	204
4.3. Источники информации	206
4.3.1. /proc	208
4.3.2. /sys	212
4.3.3. Учет задержек	213
4.3.4. netlink	214
4.3.5. Точки трассировки	214

4.3.6. kprobes.....	219
4.3.7. uprobes.....	222
4.3.8. USDT.....	224
4.3.9. Аппаратные счетчики (PMC).....	225
4.3.10. Другие источники информации для наблюдения.....	229
4.4. sag.....	231
4.4.1. Область покрытия sag(1).....	232
4.4.2. Мониторинг с sag(1).....	232
4.4.3. Вывод оперативной информации с помощью sag(1).....	236
4.4.4. Документация с описанием sag(1).....	236
4.5. Инструменты трассировки.....	237
4.6. Наблюдение за наблюдаемостью.....	237
4.7. Упражнения.....	239
4.8. Ссылки.....	240
Глава 5. Приложения.....	241
5.1. Основы приложений.....	242
5.1.1. Цель.....	243
5.1.2. Оптимизация общего случая.....	245
5.1.3. Наблюдаемость.....	245
5.1.4. Нотация «О-большое».....	245
5.2. Методы повышения производительности приложений.....	247
5.2.1. Выбор размеров блоков ввода/вывода.....	247
5.2.2. Кэширование.....	248
5.2.3. Буферизация.....	248
5.2.4. Опрос.....	248
5.2.5. Конкурентность и параллелизм.....	249
5.2.6. Неблокирующий ввод/вывод.....	254
5.2.7. Привязка к процессору.....	255
5.2.8. Мантры производительности.....	255
5.3. Языки программирования.....	256
5.3.1. Компилируемые языки.....	256
5.3.2. Интерпретируемые языки.....	258
5.3.3. Виртуальные машины.....	259
5.3.4. Сборка мусора.....	259

5.4. Методология	260
5.4.1. Профилирование процессора.....	261
5.4.2. Анализ времени ожидания вне процессора.....	264
5.4.3. Анализ системных вызовов.....	268
5.4.4. Метод USE.....	269
5.4.5. Анализ состояния потока	270
5.4.6. Анализ блокировок.....	275
5.4.7. Настройка статической производительности	276
5.4.8. Распределенная трассировка.....	277
5.5. Инструменты наблюдения	277
5.5.1. perf.....	278
5.5.2. profile.....	281
5.5.3. offcputime.....	282
5.5.4. strace.....	284
5.5.5. execsnoop.....	286
5.5.6. syscount	287
5.5.7. bpftrace	288
5.6. Проблемы.....	292
5.6.1. Отсутствие символов	293
5.6.2. Отсутствие стеков	294
5.7. Упражнения.....	295
5.8. Ссылки	297
 Глава 6. Процессоры	 299
6.1. Терминология	300
6.2. Модели.....	301
6.2.1. Архитектура процессора.....	301
6.2.2. Кэш-память процессора.....	302
6.2.3. Очереди на выполнение.....	303
6.3. Понятия	303
6.3.1. Тактовая частота	304
6.3.2. Инструкции	304
6.3.3. Вычислительный конвейер.....	305
6.3.4. Ширина инструкций.....	305
6.3.5. Размеры инструкций.....	306

6.3.6. SMT	306
6.3.7. IPC, CPI	306
6.3.8. Потребление	307
6.3.9. Время в режиме пользователя/ядра	308
6.3.10. Насыщенность	308
6.3.11. Вытеснение	309
6.3.12. Инверсия приоритета	309
6.3.13. Несколько процессов, несколько потоков	310
6.3.14. Размер слова	312
6.3.15. Оптимизации компилятора	312
6.4. Архитектура	312
6.4.1. Аппаратное обеспечение	312
6.4.2. Программное обеспечение	326
6.5. Методология	330
6.5.1. Метод инструментов	331
6.5.2. Метод USE	332
6.5.3. Определение характеристик рабочей нагрузки	333
6.5.4. Профилирование	335
6.5.5. Анализ тактов	338
6.5.6. Мониторинг производительности	339
6.5.7. Статическая настройка производительности	340
6.5.8. Настройка приоритетов	340
6.5.9. Управление ресурсами	341
6.5.10. Привязка к процессору	342
6.5.11. Микробенчмаркинг	342
6.6. Инструменты наблюдения	343
6.6.1. uptime	344
6.6.2. vmstat	347
6.6.3. mpstat	348
6.6.4. sar	349
6.6.5. ps	350
6.6.6. top	351
6.6.7. pidstat	352
6.6.8. time, ptime	353

6.6.9. turbostat	354
6.6.10. showboost.....	355
6.6.11. pmcarch	355
6.6.12. tlstat	356
6.6.13. perf	357
6.6.14. profile	367
6.6.15. cpudist.....	369
6.6.16. runqlat.....	370
6.6.17. runqlen.....	371
6.6.18. softirqs.....	372
6.6.19. hardirqs	373
6.6.20. bpftrace	373
6.6.21. Другие инструменты.....	376
6.7. Методы визуализации	379
6.7.1. Тепловая карта потребления	379
6.7.2. Тепловая карта с субсекундным смещением	380
6.7.3. Флейм-графики	381
6.7.4. FlameScope	384
6.8. Эксперименты	385
6.8.1. Ad hoc.....	386
6.8.2. SysBench	386
6.9. Настройка	387
6.9.1. Параметры компилятора	387
6.9.2. Приоритет и класс планирования	387
6.9.3. Параметры планировщика	388
6.9.4. Режимы масштабирования частоты	389
6.9.5. Состояния энергопотребления	390
6.9.6. Привязка к процессору.....	390
6.9.7. Исключительные процессорные наборы	390
6.9.8. Управление ресурсами.....	391
6.9.9. Параметры безопасной загрузки.....	391
6.9.10. Параметры процессора (настройка BIOS).....	392
6.10. Упражнения.....	392
6.11. Ссылки.....	393

Глава 7. Память	396
7.1. Терминология	397
7.2. Основные понятия.....	398
7.2.1. Виртуальная память.....	398
7.2.2. Подкачка страниц.....	399
7.2.3. Подкачка страниц по требованию	401
7.2.4. Чрезмерное выделение памяти.....	402
7.2.5. Подкачка процессов	403
7.2.6. Использование кэша файловой системы	403
7.2.7. Потребление и насыщение	403
7.2.8. Распределители.....	404
7.2.9. Разделяемая память.....	404
7.2.10. Размер рабочего набора	405
7.2.11. Размер слова	405
7.3. Архитектура	406
7.3.1. Аппаратное обеспечение.....	406
7.3.2. Программное обеспечение	411
7.3.3. Адресное пространство процесса.....	416
7.4. Методология	421
7.4.1. Метод инструментов	422
7.4.2. Метод USE.....	422
7.4.3. Определение характеристик потребления памяти.....	424
7.4.4. Анализ тактов	425
7.4.5. Мониторинг производительности.....	425
7.4.6. Выявление утечек.....	426
7.4.7. Статическая настройка производительности.....	427
7.4.8. Управление ресурсами.....	427
7.4.9. Микробенчмаркинг	428
7.4.10. Уменьшение потребления памяти.....	428
7.5. Инструменты наблюдения.....	428
7.5.1. vmstat	429
7.5.2. PSI.....	431
7.5.3. swapon.....	431
7.5.4. sar	431

7.5.5. slabtop	434
7.5.6. numastat	435
7.5.7. ps.....	436
7.5.8. top.....	437
7.5.9. pmap.....	438
7.5.10. perf.....	439
7.5.11. drsnoop	443
7.5.12. wss.....	443
7.5.13. bpftrace.....	444
7.5.14. Другие инструменты.....	449
7.6. Настройка	451
7.6.1. Настраиваемые параметры	452
7.6.2. Несколько размеров страниц	454
7.6.3. Распределители.....	455
7.6.4. Привязка NUMA	455
7.6.5. Управление ресурсами.....	456
7.7. Упражнения.....	456
7.8. Ссылки	458
Глава 8. Файловые системы.....	460
8.1. Терминология	461
8.2. Модели.....	462
8.2.1. Интерфейсы файловых систем.....	462
8.2.2. Кэш файловой системы.....	463
8.2.3. Кэш второго уровня.....	464
8.3. Основные понятия.....	464
8.3.1. Задержки в файловой системе.....	464
8.3.2. Кэширование.....	465
8.3.3. Произвольный и последовательный ввод/вывод	465
8.3.4. Предварительная выборка	466
8.3.5. Упреждающее чтение	467
8.3.6. Кэширование с отложенной записью.....	468
8.3.7. Синхронная запись	468
8.3.8. Прямой и низкоуровневый ввод/вывод.....	469
8.3.9. Неблокирующий ввод/вывод.....	470

8.3.10. Файлы, отображаемые в память	470
8.3.11. Метаданные.....	471
8.3.12. Логический и физический ввод/вывод.....	472
8.3.13. Неравноценность операций.....	474
8.3.14. Специальные файловые системы.....	475
8.3.15. Доступ к отметкам времени.....	475
8.3.16. Емкость.....	476
8.4. Архитектура	476
8.4.1. Стек ввода-вывода файловой системы.....	476
8.4.2. VFS.....	477
8.4.3. Кэши файловой системы	478
8.4.4. Особенности файловых систем.....	481
8.4.5. Типы файловых систем	482
8.4.6. Тома и пулы	490
8.5. Методология	491
8.5.1. Анализ дисков.....	492
8.5.2. Анализ задержек.....	492
8.5.3. Определение характеристик рабочей нагрузки.....	495
8.5.4. Мониторинг производительности.....	497
8.5.5. Статическая настройка производительности.....	498
8.5.6. Настройка кэша.....	498
8.5.7. Разделение рабочей нагрузки	498
8.5.8. Микробенчмаркинг	499
8.6. Инструменты наблюдения	501
8.6.1. mount.....	502
8.6.2. free.....	502
8.6.3. top.....	503
8.6.4. vmstat.....	503
8.6.5. sar	503
8.6.6. slabtop.....	504
8.6.7. strace.....	505
8.6.8. fatrace.....	505
8.6.9. LatencyTOP.....	506
8.6.10. opensnoop	507
8.6.11. filetop	508

8.6.12. cachestat	509
8.6.13. ext4dist (xfs, zfs, btrfs, nfs)	510
8.6.14. ext4slower (xfs, zfs, btrfs, nfs)	511
8.6.15. bpftrace	512
8.6.17. Другие инструменты	519
8.6.18. Визуализация	520
8.7. Эксперименты	521
8.7.1. Ad hoc	522
8.7.2. Инструменты микробенчмаркинга	522
8.7.3. Очистка кэша	524
8.8. Настройка	525
8.8.1. Функции	525
8.8.2. ext4	526
8.8.3. ZFS	529
8.9. Упражнения	530
8.10. Ссылки	532
Глава 9. Диски	533
9.1. Терминология	534
9.2. Модели	535
9.2.1. Простой диск	535
9.2.2. Кэширующие диски	536
9.2.3. Контроллер	536
9.3. Основные понятия	537
9.3.1. Измерение времени	537
9.3.2. Масштаб времени	540
9.3.3. Кэширование	541
9.3.4. Произвольный и последовательный ввод/вывод	542
9.3.5. Соотношение операций чтения и записи	543
9.3.6. Размер ввода/вывода	543
9.3.7. Несопоставимость количества операций в секунду	544
9.3.8. Дисковые команды, не связанные с передачей данных	544
9.3.9. Потребление	545
9.3.10. Насыщенность	546
9.3.11. Ожидание ввода/вывода	546

9.3.12. Синхронный и асинхронный ввод/вывод.....	547
9.3.13. Дисковый ввод/вывод и ввод/вывод в приложении.....	548
9.4. Архитектура	548
9.4.1. Типы дисков	548
9.4.2. Интерфейсы	557
9.4.3. Типы хранилищ.....	559
9.4.4. Стек дискового ввода/вывода в операционной системе	563
9.5. Методология	567
9.5.1. Метод инструментов	568
9.5.2. Метод USE.....	568
9.5.3. Мониторинг производительности.....	570
9.5.4. Определение характеристик рабочей нагрузки.....	571
9.5.5. Анализ задержек.....	573
9.5.6. Статическая настройка производительности.....	574
9.5.7. Настройка кэширования.....	575
9.5.8. Управление ресурсами.....	576
9.5.9. Микробенчмаркинг	576
9.5.10. Масштабирование.....	577
9.6. Инструменты наблюдения.....	578
9.6.1. iostat	579
9.6.2. sar	584
9.6.3. PSI.....	585
9.6.4. pidstat.....	586
9.6.5. perf.....	587
9.6.6. biolatency	590
9.6.7. biosnoop.....	592
9.6.8. iotop, biotop.....	594
9.6.9. biostacks	596
9.6.10. blktrace	597
9.6.11. bpftrace	601
9.6.12. MegaCli	605
9.6.13. smartctl.....	606
9.6.14. Журналирование SCSI	607
9.6.15. Другие инструменты.....	608

9.7. Визуализация.....	609
9.7.1. Линейные диаграммы.....	609
9.7.2. Диаграммы рассеяния задержек.....	609
9.7.3. Тепловые карты задержек.....	610
9.7.4. Тепловые карты смещений.....	611
9.7.5. Тепловые карты потребления.....	612
9.8. Эксперименты.....	612
9.8.1. Ad hoc.....	613
9.8.2. Пользовательские генераторы нагрузки.....	613
9.8.3. Инструменты микробенчмаркинга.....	614
9.8.4. Пример произвольного чтения.....	614
9.8.5. ioping.....	615
9.8.6. fio.....	615
9.8.7. blkreplay.....	615
9.9. Настройка.....	616
9.9.1. Параметры операционной системы.....	616
9.9.2. Настраиваемые параметры дисковых устройств.....	617
9.9.3. Настраиваемые параметры контроллера диска.....	618
9.10. Упражнения.....	618
9.11. Ссылки.....	619
Глава 10. Сеть.....	622
10.1. Терминология.....	623
10.2. Модели.....	624
10.2.1. Сетевой интерфейс.....	624
10.2.2. Контроллер.....	624
10.2.3. Стек протоколов.....	625
10.3. Основные понятия.....	626
10.3.1. Сети и маршрутизация.....	626
10.3.2. Протоколы.....	627
10.3.3. Инкапсуляция.....	628
10.3.4. Размер пакета.....	628
10.3.5. Задержка.....	629
10.3.6. Буферизация.....	631
10.3.7. Очередь запросов на подключение.....	632

10.3.8. Согласование интерфейса.....	632
10.3.9. Предотвращение перегрузки.....	633
10.3.10. Потребление	633
10.3.11. Локальные подключения	634
10.4. Архитектура	635
10.4.1. Протоколы.....	635
10.4.2. Оборудование.....	643
10.4.3. Программное обеспечение	646
10.5. Методология.....	655
10.5.1. Метод инструментов.....	655
10.5.2. Метод USE	656
10.5.3. Определение характеристик рабочей нагрузки.....	657
10.5.4. Анализ задержек.....	659
10.5.5. Мониторинг производительности	660
10.5.6. Перехват пакетов.....	661
10.5.7. Анализ TCP.....	662
10.5.8. Статическая настройка производительности	663
10.5.9. Управление ресурсами	664
10.5.10. Микробенчмаркинг.....	665
10.6. Инструменты наблюдения.....	665
10.6.1. ss.....	666
10.6.2. ip.....	668
10.6.3. ifconfig.....	670
10.6.4. nstat	670
10.6.5. netstat	671
10.6.6. sar	675
10.6.7. nicstat.....	678
10.6.8. ethtool.....	679
10.6.9. tcplife.....	680
10.6.10. tcptop.....	681
10.6.11. tcpretrans.....	682
10.6.12. bpftrace.....	683
10.6.13. tcpdump	691
10.6.14. Wireshark.....	693
10.6.15. Другие инструменты.....	694

10.7. Эксперименты	695
10.7.1. ping.....	695
10.7.2. traceroute.....	696
10.7.3. pathchar.....	697
10.7.4. iperf.....	698
10.7.5. netperf.....	699
10.7.6. tc.....	699
10.7.7. Другие инструменты.....	700
10.8. Настройка	701
10.8.1. Общесистемные.....	701
10.8.2. Параметры сокетов.....	707
10.8.3. Конфигурация.....	708
10.9. Упражнения	708
10.10. Ссылки	709
Глава 11. Облачные вычисления	714
11.1. Основы	715
11.1.1. Типы экземпляров.....	716
11.1.2. Масштабируемая архитектура.....	717
11.1.3. Планирование мощности.....	718
11.1.4. Хранилище.....	721
11.1.5. Мультиарендность.....	722
11.1.6. Оркестровка (Kubernetes).....	723
11.2. Виртуализация оборудования	724
11.2.1. Реализация.....	726
11.2.2. Оверхед.....	727
11.2.3. Управление ресурсами.....	734
11.2.4. Наблюдаемость.....	738
11.3. Виртуализация операционной системы	746
11.3.1. Реализация.....	748
11.3.2. Оверхед.....	751
11.3.3. Управление ресурсами.....	755
11.3.4. Наблюдаемость.....	760
11.4. Легковесная виртуализация	775
11.4.1. Реализация.....	776

11.4.2. Оверхед.....	777
11.4.3. Управление ресурсами.....	777
11.4.4. Наблюдаемость.....	777
11.5. Другие типы виртуализации.....	779
11.6. Сравнение.....	780
11.7. Упражнения.....	782
11.8. Ссылки.....	783
Глава 12. Бенчмаркинг.....	786
12.1. Основы.....	787
12.1.1. Причины.....	787
12.1.2. Эффективный бенчмаркинг.....	788
12.1.3. Проблемы бенчмаркинга.....	790
12.2. Типы бенчмаркинга.....	798
12.2.1. Микробенчмаркинг.....	799
12.2.2. Моделирование.....	801
12.2.3. Воспроизведение.....	802
12.2.4. Отраслевые стандарты.....	803
12.3. Методология.....	805
12.3.1. Пассивный бенчмаркинг.....	805
12.3.2. Активный бенчмаркинг.....	806
12.3.3. Профилирование процессора.....	809
12.3.4. Метод USE.....	811
12.3.5. Определение характеристик рабочей нагрузки.....	811
12.3.6. Собственный бенчмаркинг.....	811
12.3.7. Пиковая нагрузка.....	812
12.3.8. Проверка правильности.....	814
12.3.9. Статистический анализ.....	815
12.3.10. Чек-лист бенчмаркинга.....	816
12.4. Вопросы о бенчмаркинге.....	817
12.5. Упражнения.....	819
12.6. Ссылки.....	819
Глава 13. perf.....	821
13.1. Обзор подкоманд.....	822
13.2. Однострочные сценарии.....	824

13.3. События perf.....	830
13.4. Аппаратные события.....	832
13.4.1. Дискретная выборка	833
13.5. Программные события.....	834
13.6. События точек трассировки.....	835
13.7. События зондов	836
13.7.1. kprobes.....	836
13.7.2. uprobes.....	838
13.7.3. USDT	840
13.8. perf stat	842
13.8.1. Параметры	843
13.8.2. Интервальные статистики	844
13.8.3. Баланс между процессорами	844
13.8.4. Фильтрация событий.....	844
13.8.5. Теневые статистики	845
13.9. perf record.....	845
13.9.1. Параметры	846
13.9.2. Профилирование процессора	846
13.9.3. Обход стека	847
13.10. perf report	848
13.10.1. TUI.....	848
13.10.2. STDIO.....	849
13.11. perf script	850
13.11.1. Флейм-графики.....	852
13.11.2. Сценарии обработки трассировок	852
13.12. perf trace	852
13.12.1. Версии ядра.....	853
13.13. Другие команды	854
13.14. Документация perf.....	855
13.15. Ссылки.....	855
Глава 14. Ftrace	857
14.1. Обзор возможностей.....	858
14.2. tracefs (/sys)	861
14.2.1. Содержимое tracefs.....	861

14.3. Профилировщик функций	863
14.4. Трассировщик function	865
14.4.1. Использование файла trace	866
14.4.2. Использование файла trace_pipe	867
14.4.3. Параметры	868
14.5. Точки трассировки	869
14.5.1. Фильтрация	870
14.5.2. Триггеры	871
14.6. Зонды kprobes	871
14.6.1. Трассировка событий	871
14.6.2. Аргументы	872
14.6.3. Возвращаемые значения	873
14.6.4. Фильтры и триггеры	874
14.6.5. Профилировщик kprobe	874
14.7. Зонды uprobes	875
14.7.1. Трассировка событий	875
14.7.2. Аргументы и возвращаемые значения	876
14.7.3. Фильтры и триггеры	876
14.7.4. Профилировщик uprobe	876
14.8. Трассировщик function_graph	876
14.8.1. Трассировка графа	877
14.8.2. Параметры	878
14.9. Трассировщик hwlat	878
14.10. Триггеры hist	879
14.10.1. Гистограмма с единственным ключом	880
14.10.2. Поля	881
14.10.3. Модификаторы	881
14.10.4. Фильтры PID	882
14.10.5. Гистограмма с несколькими ключами	882
14.10.6. Трассировки стека в роли ключей	883
14.10.7. Синтетические события	884
14.11. trace-cmd	887
14.11.1. Обзор подкоманд	887
14.11.2. Однострочные сценарии для trace-cmd	889

14.11.3. Сравнение trace-cmd и perf(1).....	891
14.11.4. trace-cmd function_graph.....	892
14.11.5. KernelShark	892
14.11.6. Документация для trace-cmd	894
14.12. perf ftrace.....	894
14.13. perf-tools.....	895
14.13.1. Покрытие инструментами	895
14.13.2. Специализированные инструменты	896
14.13.3. Многоцелевые инструменты	898
14.13.4. Однострочные сценарии для perf-tools	898
14.13.5. Пример.....	901
14.13.6. Сравнение perf-tools и BCC/BPF	901
14.13.7. Документация	902
14.14. Документация для Ftrace.....	902
14.15. Ссылки.....	903
Глава 15. BPF.....	904
15.1. BCC.....	907
15.1.1. Установка	908
15.1.2. Покрытие инструментами	908
15.1.3. Специализированные инструменты.....	909
15.1.4. Многоцелевые инструменты.....	911
15.1.5. Однострочные сценарии.....	911
15.1.6. Пример многоцелевого инструмента	913
15.1.7. Сравнение BCC и bpftrace	914
15.1.8. Документация	914
15.2. bpftrace	915
15.2.1. Установка	917
15.2.2. Инструменты.....	917
15.2.3. Однострочные сценарии.....	918
15.2.4. Программирование.....	920
15.2.5. Справочник	929
15.2.6. Документация	937
15.3. Ссылки.....	937

Глава 16. Пример из практики	939
16.1. Необъяснимый выигрыш	939
16.1.1. Постановка задачи	939
16.1.2. Стратегия анализа.....	940
16.1.3. Статистики	941
16.1.4. Конфигурация.....	943
16.1.5. Счетчики РМС.....	944
16.1.6. Программные события.....	945
16.1.7. Трассировка.....	946
16.1.8. Заключение	948
16.2. Дополнительная информация.....	949
16.3. Ссылки.....	949
Приложение А. Метод USE: Linux	950
Приложение В. Краткий справочник по sag	957
Приложение С. Однострочные сценарии для bpftrace	959
Приложение D. Решения некоторых упражнений	966
Приложение Е. Производительность систем, кто есть кто	969
Глоссарий	974