



БИБЛИОТЕКА
ПРОГРАММИСТА

Андрей
Акиншин

Apress®



ПРОФЕССИОНАЛЬНЫЙ
БЕНЧМАРК



ИСКУССТВО ИЗМЕРЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ



Андрей Акиншин

ПРОФЕССИОНАЛЬНЫЙ БЕНЧМАРК

ИСКУССТВО ИЗМЕРЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ



Санкт-Петербург · Москва · Минск

2022

ББК 32.973.2-018-07
УДК 004.413.5
А39

Акиншин Андрей

А39 Профессиональный бенчмарк: искусство измерения производительности. — СПб.: Питер, 2022. — 576 с.: ил. — (Серия «Библиотека программиста»).

ISBN 978-5-4461-1551-8

Это исчерпывающее руководство поможет вам правильно разрабатывать бенчмарки, измерять ключевые метрики производительности приложений .NET и анализировать результаты. В книге представлены десятки кейсов, проясняющих сложные аспекты бенчмаркинга. Ее изучение позволит вам избежать распространенных ошибок, проконтролировать точность измерений и повысить производительность своих программ.

16+ (В соответствии с Федеральным законом от 29 декабря 2010 г. № 436-ФЗ.)

ББК 32.973.2-018-07
УДК 004.413.5

Права на издание получены по соглашению с с APress Media, LLC, part of Springer Nature. Все права защищены. Никакая часть данной книги не может быть воспроизведена в какой бы то ни было форме без письменного разрешения владельцев авторских прав.

Информация, содержащаяся в данной книге, получена из источников, рассматриваемых издательством как надежные. Тем не менее, имея в виду возможные человеческие или технические ошибки, издательство не может гарантировать абсолютную точность и полноту приводимых сведений и не несет ответственности за возможные ошибки, связанные с использованием книги. Издательство не несет ответственности за доступность материалов, ссылки на которые вы можете найти в этой книге. На момент подготовки книги к изданию все ссылки на интернет-ресурсы были действующими.

ISBN 978-1484249406 англ.

First published in English under the title Pro .NET Benchmarking: The Art of Performance Measurement by Andrey Akinshin, edition: 1 © Andrey Akinshin, 2019 *

This edition has been translated and published under licence from APress Media, LLC, part of Springer Nature. APress Media, LLC, part of Springer Nature takes no responsibility and shall not be made liable for the accuracy of the translation.

ISBN 978-5-4461-1551-8

© Перевод на русский язык ООО Издательство «Питер», 2022
© Издание на русском языке, оформление ООО Издательство «Питер», 2022
© Серия «Библиотека программиста», 2022

Краткое содержание

Об авторе.....	15
О научных редакторах.....	16
Благодарности.....	17
От издательства.....	19
Введение.....	20
Глава 1. Введение в бенчмаркинг.....	25
Глава 2. Подводные камни бенчмаркинга	52
Глава 3. Как окружение влияет на производительность	103
Глава 4. Статистика для специалистов по производительности	178
Глава 5. Анализ и тестирование производительности	247
Глава 6. Инструменты для диагностики	336
Глава 7. Бенчмарки, ограниченные возможностями процессора	367
Глава 8. Бенчмарки, ограниченные возможностями памяти	469
Глава 9. Аппаратные и программные таймеры	512

Оглавление

Об авторе.....	15
О научных редакторах.....	16
Благодарности.....	17
От издательства.....	19
Введение.....	20
Структура книги.....	21
Примеры.....	23
Ожидания.....	23
Глава 1. Введение в бенчмаркинг.....	25
Планирование измерения производительности.....	26
Определение проблемы и целей.....	27
Подбор правильных метрик.....	28
Выбор подхода и инструментов.....	30
Проведение эксперимента и получение результатов.....	32
Анализ и формулирование выводов.....	32
Цели бенчмаркинга.....	33
Анализ производительности.....	33
Бенчмаркинг как инструмент маркетинга.....	35
Научный интерес.....	36
Бенчмаркинг ради развлечения.....	36
Требования к бенчмаркам.....	37
Повторяемость.....	37
Проверяемость и переносимость.....	38

Принцип невмешательства.....	38
Приемлемый уровень точности	39
Честность	40
Пространства производительности	40
Основы.....	40
Модель производительности.....	42
Исходный код.....	42
Окружение	43
Входные данные	44
Распределение.....	45
Пространство.....	47
Анализ	47
Плохой, непонятный и хороший	47
Поиск узкого места.....	49
Статистика	50
Выводы.....	51
Глава 2. Подводные камни бенчмаркинга	52
Общие подводные камни	53
Неточные замеры времени	53
Неправильный запуск бенчмарка	56
Естественный шум.....	61
Сложные распределения	65
Измерение холодной загрузки вместо прогретого стабильного состояния.....	67
Недостаточное количество вызовов.....	69
Накладные расходы на инфраструктуру	72
Неравноценные итерации.....	73
Подводные камни, специфичные для .NET	77
Развертывание циклов	77
Удаление неисполняемого кода.....	81
Свертка констант	85
Удаление проверки границ.....	89
Инлайнинг.....	91
Условное JIT-компилирование	94
Диспетчеризация методов интерфейса	97
Выводы.....	100

Глава 3. Как окружение влияет на производительность	103
Среда исполнения	106
.NET Framework	107
.NET Core	110
Mono	115
Практический пример 1: StringBuilder и версии CLR	119
Практический пример 2: Dictionary и рандомизированное хеширование строк	122
Практический пример 3: IList.Count и неожиданное снижение производительности	124
Практический пример 4: время сборки и разрешение GetLastWriteTime	127
Подводя итог	129
Компиляция	129
Генерация промежуточного языка	130
JIT-компиляция	135
Компиляция Ahead-of-Time (AOT)	138
Практический пример 1: Switch и версии компилятора C#	142
Практический пример 2: params и распределение памяти	145
Практический пример 3: замена и неочевидный промежуточный язык	146
Практический пример 4: большие методы и JIT-компиляция	149
Подводя итог	151
Внешнее окружение	152
Операционная система	152
Аппаратные средства	159
Физический мир	162
Практический пример 1: обновления Windows и изменения в .NET Framework	166
Практический пример 2: Meltdown, Spectre и важные патчи	167
Практический пример 3: MSBuild и Защитник Windows	169
Практический пример 4: длительность паузы и Intel Skylake	170
Подводя итог	172
Выводы	172
Источники	174
Глава 4. Статистика для специалистов по производительности	178
Описательная статистика	180
Базовые графики выборки	180
Размер выборки	183
Минимум, максимум и размах	184

Среднее арифметическое	185
Медиана.....	185
Квантили, квартили и процентиля	186
Выбросы.....	188
Диаграммы размаха.....	190
Частотные трассы	191
Моды	193
Дисперсия случайной величины и стандартное отклонение	196
Нормальное распределение.....	198
Коэффициент асимметрии	199
Коэффициент эксцесса распределения.....	200
Стандартная ошибка и доверительные интервалы.....	202
Центральная предельная теорема	205
Подводя итог	206
Анализ производительности	208
Сравнение распределений	209
Регрессионные модели.....	218
Произвольная остановка.....	224
Пробные эксперименты.....	229
Подводя итог	231
Как лгать с помощью бенчмаркинга	232
Ложь с помощью маленьких выборок	233
Ложь с помощью процентов.....	235
Ложь с помощью пропорций	236
Ложь с помощью графиков.....	238
Ложь с помощью слепого прочесывания данных.....	240
Подводя итог	242
Выводы.....	243
Источники.....	244
Глава 5. Анализ и тестирование производительности	247
Цели тестирования производительности	250
Цель 1: предотвращение ухудшения производительности	250
Цель 2: обнаружение непредотвращенных случаев ухудшения.....	252
Цель 3: обнаружение других типов аномалий производительности.....	252
Цель 4: снижение уровня ошибок 1-го рода	253
Цель 5: снижение уровня ошибок 2-го рода	253
Цель 6: автоматизация всего перечисленного	254
Подводя итог	256

Виды бенчмарков и тестов производительности	256
Тесты холодной загрузки	257
Разогретые тесты	260
Асимптотические тесты	264
Тесты длительности и выработки	266
Модульные и интеграционные тесты	268
Мониторинг и телеметрия	273
Тесты с внешними взаимозависимостями	274
Другие виды тестов производительности	276
Подводя итог	278
Аномалии производительности	278
Ухудшение	279
Ускорение	281
Временная кластеризация	282
Пространственная кластеризация	286
Высокая длительность	287
Высокая дисперсия	289
Высокие выбросы	290
Мультимодальные распределения	291
Ложные аномалии	293
Скрытые проблемы и рекомендации	297
Подводя итог	300
Стратегии защиты	301
Тесты перед подтверждением	302
Ежедневные тесты	303
Ретроспективный анализ	304
Тестирование контрольных точек	304
Тестирование до релиза	305
Тестирование вручную	306
Телеметрия и мониторинг после релиза	307
Подводя итог	308
Подпространства производительности	308
Подпространство метрик	309
Подпространство запусков	310
Подпространство тестов	311
Подпространство окружения	312
Подпространство параметров	313

Подпространство истории	314
Подводя итог	315
Уведомления и сигналы тревоги в сфере производительности	315
Абсолютный порог	317
Относительный порог	319
Адаптивный порог	320
Вручную настроенный порог	320
Подводя итог	322
Разработка с ориентацией на производительность	322
Определите задачу и цели в области производительности.....	323
Напишите тест производительности	324
Измените код.....	326
Проверьте новое пространство производительности	326
Подводя итог	327
Культура производительности	327
Общие цели в области производительности.....	328
Надежная инфраструктура для тестирования производительности	329
Чистота в области производительности.....	330
Личная ответственность.....	331
Подводя итог	331
Выводы.....	332
Источники.....	334
Глава 6. Инструменты для диагностики	336
BenchmarkDotNet.....	338
Инструменты Visual Studio.....	343
Встроенные профайлеры.....	343
Обзор дизассемблирования.....	344
Инструменты JetBrains.....	345
dotPeek.....	345
dotTrace и dotMemory	346
ReSharper	349
Rider.....	350
Windows Sysinternals.....	351
RAMMap	352
VMMap	353
Process Monitor	353

Другие полезные инструменты	354
ildasm и ilasm.....	355
Monodis.....	356
ILSpy.....	357
dnSpy	357
WinDbg.....	358
Asm-Dude	360
Консольные инструменты для Mono	360
PerfView.....	361
perfcollеct.....	362
Process Hacker	362
Intel VTune Amplifier	363
Выводы.....	364
Источники.....	365
Глава 7. Бенчмарки, ограниченные возможностями процессора.....	367
Регистры и стек	369
Практический пример 1: продвижение структуры	369
Практический пример 2: локальные переменные	372
Практический пример 3: попытка-перехват.....	376
Практический пример 4: количество вызовов.....	379
Подводя итог	381
Инлайнинг	382
Практический пример 1: ограничения вызова.....	383
Практический пример 2: размещение регистров.....	387
Практический пример 3: кооперативные оптимизации.....	391
Практический пример 4: команда на промежуточном языке starg	394
Подводя итог	397
Параллелизм на уровне команд.....	399
Практический пример 1: параллельное выполнение	400
Практический пример 2: взаимозависимости данных.....	404
Практический пример 3: диаграмма взаимозависимостей	406
Практический пример 4: очень короткие циклы	409
Подводя итог	413
Прогнозирование ветвления	414
Практический пример 1: отсортированные и неотсортированные данные	414
Практический пример 2: количество условий.....	419
Практический пример 3: минимум.....	423

Практический пример 4: схемы	428
Подводя итог	431
Арифметика.....	431
Практический пример 1: денормализованные числа	435
Практический пример 2: Math.Abs.....	440
Практический пример 3: double.ToString.....	443
Практический пример 4: деление целых чисел	445
Подводя итог	450
Интринзики.....	451
Практический пример 1: Math.Round	451
Практический пример 2: ротация битов.....	454
Практический пример 3: векторизация	456
Практический пример 4: System.Runtime.Intrinsics	460
Подводя итог	463
Выводы.....	464
Источники.....	466
Глава 8. Бенчмарки, ограниченные возможностями памяти.....	469
Кэш процессора.....	470
Практический пример 1: схемы доступа к памяти.....	471
Практический пример 2: уровни кэша	473
Практический пример 3: ассоциативность кэша	476
Практический пример 4: ошибочное разделение	479
Подводя итог	482
Схема размещения памяти.....	483
Практический пример 1: размещение структур.....	483
Практический пример 2: конфликты кэш-банка.....	485
Практический пример 3: расщепление кэш-строки.....	488
Практический пример 4: альтернативное именование 4К	490
Подводя итог	495
Сборщик мусора	496
Практический пример 1: режимы сборки мусора.....	496
Практический пример 2: объем «инкубатора» в Mono.....	500
Практический пример 3: области динамической памяти для крупных объектов.....	503
Практический пример 4: финализация.....	505
Подводя итог	507
Выводы.....	508
Источники.....	509

Глава 9. Аппаратные и программные таймеры	512
Терминология	513
Единицы времени	513
Единицы частоты	515
Основные компоненты аппаратного таймера	517
Тики и погрешности дискретизации	519
Основные характеристики таймеров	521
Подводя итог	525
Аппаратные таймеры	526
TSC	527
HPET и ACPI PM	533
История магических чисел	535
Подводя итог	538
API для проставления отметок времени в ОС	539
API для проставления отметок времени в Windows: системный таймер	540
API для проставления отметок времени в Windows: QPC	547
API для проставления отметок времени в Unix	550
Подводя итог	554
API для проставления отметок времени на платформе .NET	555
DateTime.UtcNow	555
Подводя итог	563
Подводные камни при проставлении отметок времени	564
Низкое разрешение	564
Переполнение счетчика	564
Компоненты времени и общие свойства	565
Изменения в текущем времени	566
Последовательные чтения	567
Подводя итог	570
Выводы	571
Источники	573