




БИБЛИОТЕКА  
ПРОГРАММИСТА

Андрей  
Акиншин

Apress®



ПРОФЕССИОНАЛЬНЫЙ  
БЕНЧМАРК

 ИСКУССТВО ИЗМЕРЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ



**Андрей Акиньшин**

# **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
<b>Глава 1.</b> Введение в бенчмаркинг.....	25
<b>Глава 2.</b> Подводные камни бенчмаркинга .....	52
<b>Глава 3.</b> Как окружение влияет на производительность .....	103
<b>Глава 4.</b> Статистика для специалистов по производительности .....	178
<b>Глава 5.</b> Анализ и тестирование производительности .....	247
<b>Глава 6.</b> Инструменты для диагностики .....	336
<b>Глава 7.</b> Бенчмарки, ограниченные возможностями процессора .....	367
<b>Глава 8.</b> Бенчмарки, ограниченные возможностями памяти .....	469
<b>Глава 9.</b> 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
<b>Глава 1. Введение в бенчмаркинг.....</b>	<b>25</b>
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
<b>Глава 2. Подводные камни бенчмаркинга .....</b>	<b>52</b>
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

<b>Глава 3. Как окружение влияет на производительность</b> .....	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
<b>Глава 4. Статистика для специалистов по производительности</b> .....	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
<b>Глава 5. Анализ и тестирование производительности .....</b>	<b>247</b>
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
<b>Глава 6. Инструменты для диагностики .....</b>	<b>336</b>
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
<b>Глава 7. Бенчмарки, ограниченные возможностями процессора.....</b>	<b>367</b>
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
<b>Глава 8. Бенчмарки, ограниченные возможностями памяти.....</b>	<b>469</b>
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

<b>Глава 9. Аппаратные и программные таймеры</b> .....	512
Терминология .....	513
Единицы времени .....	513
Единицы частоты .....	515
Основные компоненты аппаратного таймера .....	517
Тики и погрешности дискретизации .....	519
<i>Основные характеристики таймеров</i> .....	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