

Высокоуровневая многопоточность

Юрий Литвинов
y.litvinov@spbu.ru

23.09.2025

Правда про многопоточность

Если в вашей программе есть `new Thread()`, ваша программа уже устарела

- ▶ Проектируйте не в терминах потоков, а в терминах задач, которые могут исполняться параллельно
- ▶ Доверяйте управление потоками библиотекам
- ▶ Используйте высокоуровневые языковые средства
 - ▶ Проще
 - ▶ Надёжнее
 - ▶ Гораздо меньше кода писать
- ▶ Помните, что внутри всё равно потоки, продумывание синхронизации никто не отменял
 - ▶ Иногда низкоуровневые потоки внезапно наносят ответный удар

Foreground- и Background-потоки

- ▶ Когда все Foreground-потоки завершили работу, рантайм останавливает все Background-потоки и заканчивает работу приложения
- ▶ Thread по умолчанию создаётся как Foreground
 - ▶ Способ прострелить себе ногу №1: создать foreground-поток и забыть о нём, приложение будет висеть в списке задач и не завершится

Способ прострелить себе ногу №2: создать background-поток и не дать ему доработать:

```
var t = new Thread(Worker);  
t.IsBackground = true;  
t.Start();  
Console.WriteLine("Returning from Main");
```

Пул потоков

- ▶ Содержит набор заранее созданных потоков, которые могут исполнять задачи
- ▶ Управляется рантаймом
 - ▶ Новые потоки создаются при необходимости
 - ▶ Потоки автоматически удаляются, если они долго не используются и потоков больше, чем надо
 - ▶ “Сколько надо” рантайм определяет по количеству доступных ядер процессора
- ▶ Используется в .NET практически повсеместно
 - ▶ Идеологически многопоточное приложение оперирует не потоками, а задачами и асинхронными операциями
- ▶ Все потоки из пула — Background

Пример

```
public static void Main() {  
    Console.WriteLine("Главный поток: ставим задачу в очередь");  
    ThreadPool.QueueUserWorkItem(ComputeBoundOp, 5);  
    Console.WriteLine("Главный поток: занимаемся своими делами...");  
    Thread.Sleep(10000); // Симуляция работы в главном потоке  
    Console.WriteLine("Нажмите <Enter>, чтобы закрыть программу...");  
    Console.ReadLine();  
}  
  
private static void ComputeBoundOp(Object state) {  
    Console.WriteLine($"Внутри ComputeBoundOp: state={state}");  
    Thread.Sleep(1000); // Симуляция работы в потоке из пула  
}
```

Отмена операций

- ▶ `CancellationToken` — отдаётся потоку, он должен сам проверять состояние токена и прерваться, если запрошена отмена
 - ▶ Может прерваться не мгновенно, проверка возможна только время от времени
 - ▶ Называется “коллаборативная отмена”
- ▶ `CancellationTokenSource` — возвращает связанный с ним `CancellationToken`, может выставлять для него флаг отмены, остаётся в основном потоке

Пример

```
public static void Main() {  
    var cts = new CancellationTokenSource();  
    ThreadPool.QueueUserWorkItem(o => Count(cts.Token, 1000));  
    Console.ReadLine();  
    cts.Cancel();  
    Console.ReadLine();  
}  
  
private static void Count(CancellationToken token, int countTo) {  
    for (int count = 0; count < countTo; count++) {  
        if (token.IsCancellationRequested) {  
            break;  
        }  
        Thread.Sleep(200);  
    }  
}
```

Task

- ▶ Абстракция задачи, которая может быть выполнена в отдельном потоке

- ▶ Эквивалентные строки кода:

```
ThreadPool.QueueUserWorkItem(ComputeBoundOp, 5);
```

```
new Task(ComputeBoundOp, 5).Start();
```

```
Task.Run(() => ComputeBoundOp(5));
```

- ▶ Позволяет ждать окончание задачи и получать результат
- ▶ Тоже важен для реализации некоторых вещей в C#, но часто используется и независимо

Пример

```
private static int Sum(int n) {  
    int sum = 0;  
    for (; n > 0; n--)  
        sum += n;  
    return sum;  
}
```

...

```
Task<int> t = new Task<int>(n => Sum((int)n), 1000000000);  
t.Start();
```

// Тут занимаемся своими делами, Sum считается в отдельном потоке из пула
t.Wait(); // t.Result сам делает Wait(), так что тут это только для иллюстрации
Console.WriteLine("Сумма: " + t.Result);

Отмена Task-a

```
private static int Sum(CancellationToken ct, int n) {  
    int sum = 0;  
    for (; n > 0; n--) {  
        ct.ThrowIfCancellationRequested();  
        sum += n;  
    }  
    return sum;  
}
```

Кидает `OperationCanceledException` в основной поток при обращении к результату (на самом деле, `AggregateException` с `OperationCanceledException`)

- ▶ Это идеологически правильнее, чем проверять `IsCancellationRequested` вручную

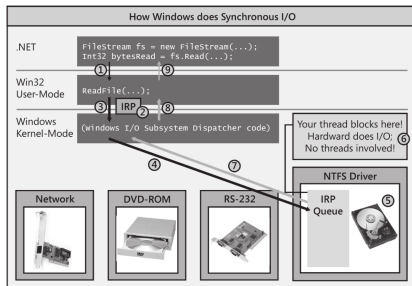
TaskScheduler

- ▶ Класс, позволяющий управлять тем, как Task-и обрабатываются пулом потоков (и пулом потоков ли вообще)
 - ▶ По умолчанию Task-и ставятся в очередь в пуле потоков
- ▶ Бывает полезно, например, чтобы задача могла модифицировать элементы GUI
 - ▶ Это можно делать только из главного потока (который создал GUI)

```
Task<int> t = Task.Run(() => Sum(cts.Token, 20000), cts.Token);  
t.ContinueWith(task => Text = "Result: " + task.Result,  
    CancellationToken.None,  
    TaskContinuationOptions.OnlyOnRanToCompletion,  
    TaskScheduler.FromCurrentSynchronizationContext());
```

async/await

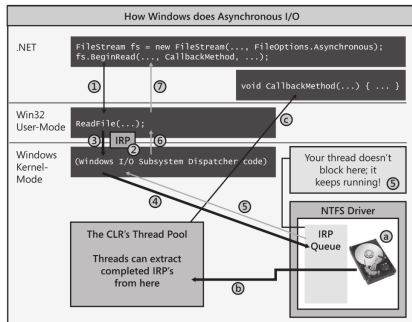
- ▶ Task и пул потоков хороши для дорогих по времени операций
- ▶ Чаще поток ждёт окончания операции ввода-вывода
- ▶ Блокирующий ввод-вывод “вешает” поток, заставляя пул потоков создавать новые



(Рисунок из Jeffrey Richter. CLR via C#)

async/await (2)

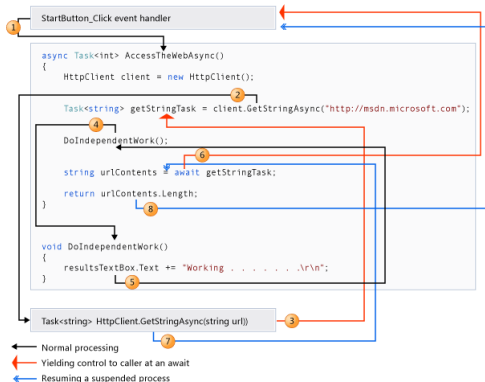
- ▶ Асинхронные операции ввода-вывода не блокируют поток, возвращая управление тут же
 - ▶ Данные, естественно, не готовы
- ▶ Старая модель в .NET — Begin...() и End...()
 - ▶ Begin...() инициирует операцию, принимая колбэк, где можно использовать End...(), чтобы забрать результат



(Рисунок из Jeffrey Richter. CLR via C#)

async/await (3)

- ▶ Новая модель: `async/await`
- ▶ Требуется поддержка компилятора
- ▶ Можно понимать как сопрограмму
- ▶ На самом деле, генерируется конечный автомат
 - ▶ Запоминает, на каком `await` сейчас мы находимся
 - ▶ Следит за исключениями



(Рисунок из MSDN)

Пример

```
private static async Task<int> Method1Async() { ... }  
private static async Task<string> Method2Async() { ... }  
  
private static async Task<string> MyMethodAsync(int argument) {  
    int local = argument;  
    try {  
        int result1 = await Method1Async();  
        for (int x = 0; x < 3; x++) {  
            string result2 = await Method2Async();  
        }  
    }  
    catch (Exception) { Console.WriteLine("Catch"); }  
    return "Done";  
}
```

Особенности

- ▶ Может возвращать только Task, Task<Result> или **void**
 - ▶ **void** используется для асинхронных обработчиков событий
- ▶ Любой Task можно ждать await-ом, любой async можно не ждать
 - ▶ Вызов Result у результата async-метода заставляет его исполниться синхронно
 - ▶ Если забыть await у асинхронного метода, он вернёт не T, а Task<T>
- ▶ Работает только с .NET 4.5 и C# 5
 - ▶ Microsoft.BCL, если надо поддержать более старый рантайм

async и исключения

```
static async Task ThrowExceptionAsync() {  
    await Task.Delay(TimeSpan.FromSeconds(1));  
    throw new InvalidOperationException("Всё плохо");  
}
```

```
static async Task TestAsync() {  
    // Исключение не бросается, а сохраняется в Task-е  
    Task task = ThrowExceptionAsync();  
    try {  
        // Исключение бросается при выполнении await (или обращении к Result)  
        await task;  
    } catch (InvalidOperationException) {  
        // Исключение ловится здесь как обычно  
    }  
}
```

Async-методы в стандартной библиотеке

- ▶ `System.IO.Stream` и потомки: `ReadAsync`, `WriteAsync`, `FlushAsync`, `CopyToAsync`
- ▶ `System.IO.TextReader` и потомки: `ReadAsync`, `ReadLineAsync`, `ReadToEndAsync`, `ReadBlockAsync`
- ▶ `System.IO.TextWriter` и потомки: `WriteAsync`, `WriteLineAsync`, `FlushAsync`
- ▶ `System.Net.Http.HttpClient`: `GetAsync`, `GetStreamAsync`, `GetByteArrayAsync`, `PostAsync`, `PutAsync`, `DeleteAsync` и т.д.
- ▶ `System.Net.WebRequest` и потомки: `GetRequestStreamAsync` и `GetResponseAsync`
- ▶ `System.Data.SqlClient.SqlCommand`: `ExecuteDbDataReaderAsync`

Ещё один способ прострелить себе ногу

Вызвать асинхронный метод из GUI-потока и заблокироваться

```
private sealed class MyWpfWindow : Window {  
    public MyWpfWindow() { Title = "WPF Window"; }  
  
    protected override void OnActivated(EventArgs e) {  
        string http = GetHttp().Result; // Синхронно вызываемся  
        base.OnActivated(e);  
    }  
  
    private async Task<String> GetHttp() {  
        HttpResponseMessage msg =  
            await new HttpClient().GetAsync("http://google.com/");  
        return await msg.Content.ReadAsStringAsync(); // Никогда не дойдём сюда  
    }  
}
```

async и Task, полезные вещи

- ▶ Подождать сколько-то миллисекунд:
`await Task.Delay(delay);`
- ▶ Сразу же вернуть результат:
// Возвращает Task, который выполняется синхронно
`Task.FromResult(13);`
- ▶ Подождать несколько Task-ов:
`int[] results = await Task.WhenAll(task1, task2, task3);`

Task.WhenAny

Простой способ организовать таймаут:

```
static async Task<string> DownloadStringWithTimeout(string uri)
{
    using (var client = new HttpClient())
    {
        var downloadTask = client.GetStringAsync(uri);
        var timeoutTask = Task.Delay(3000);
        var completedTask = await Task.WhenAny(downloadTask, timeoutTask);
        if (completedTask == timeoutTask)
            return null;
        return await downloadTask;
    }
}
```

Task Parallel Library

- ▶ Набор классов для выполнения вычислительно сложных параллельных операций (в отличие от `async/await`, ориентированных на ввод-вывод)
 - ▶ В стандартной поставке начиная с .NET 4.0
- ▶ “Распараллеливание в одну строчку”, берёт на себя управление потоками и ядрами

Пример

```
for (int i = 0; i < 1000; i++) DoWork(i);
```



```
Parallel.For(0, 1000, i => DoWork(i));
```

Или:

- ▶ `Parallel.ForEach(collection, item => DoWork(item));`
- ▶ `Parallel.Invoke(
 () => Method1(),
 () => Method2(),
 () => Method3());`

Прерывание операции

► Изнутри:

```
void InvertMatrices(IEnumerable<Matrix> matrices)
{
    Parallel.ForEach(matrices, (matrix, state) => {
        if (!matrix.IsInvertible)
            state.Stop();
        else
            matrix.Invert();
    });
}
```

► Извне:

```
void RotateMatrices(IEnumerable<Matrix> matrices, float degrees,
    CancellationToken token)
{
    Parallel.ForEach(matrices,
        new ParallelOptions { CancellationToken = token },
        matrix => matrix.Rotate(degrees));
}
```


Синхронизация нужна

```
int InvertMatrices(IEnumerable<Matrix> matrices)
{
    int nonInvertibleCount = 0;
    Parallel.ForEach(matrices, matrix =>
    {
        if (matrix.IsInvertible) {
            matrix.Invert();
        } else {
            Interlocked.Increment(ref nonInvertibleCount);
        }
    });
    return nonInvertibleCount;
}
```

Потокобезопасные коллекции

- ▶ Одновременная модификация данных из разных потоков (включая потоки пула, которые используются TPL, PLINQ и т.д.) может привести к гонке
- ▶ Потокобезопасность — свойство кода не иметь гонок при обращении из нескольких потоков
 - ▶ Thread-safe — возможность вызывать код из нескольких потоков
 - ▶ Reentrant — возможность вызывать из нескольких потоков, если каждый вызов использует свои данные
 - ▶ Весь thread-safe код reentrant, но не наоборот
- ▶ Все стандартные коллекции (List<T>, Dictionary<K, V> и т.д.) **не потокобезопасны**

Немутабельные коллекции

Нет изменяемого состояния — нет гонок

- ▶ `ImmutableStack<T>`
- ▶ `ImmutableQueue<T>`
- ▶ `ImmutableList<T>`
- ▶ `ImmutableHashSet<T>`
- ▶ `ImmutableSortedSet<T>`
- ▶ `ImmutableDictionary<K, V>`
- ▶ `ImmutableSortedDictionary<K, V>`

Но как?

```
var list = ImmutableList<int>.Empty;  
list = list.Insert(0, 13);  
list = list.Insert(0, 7);
```

// Пишет "7", затем "13".

```
foreach (var item in list)  
    Console.WriteLine(item);
```

```
list = list.RemoveAt(1);
```

А что со скоростью и памятью?

Операция	List<T>	ImmutableList<T>
Add	амортизированная $O(1)$	$O(\log N)$
Insert	$O(N)$	$O(\log N)$
RemoveAt	$O(N)$	$O(\log N)$
Item[index]	$O(1)$	$O(\log N)$

Используются сбалансированные двоичные деревья,
разделяемые между коллекциями

Потокобезопасные структуры данных

Мутабельны, используют примитивы синхронизации для избегания гонок

- ▶ Медленны, заметно медленнее немутабельных и “обычных” коллекций
- ▶ Позволяют общаться разным потокам

Что есть в стандартной библиотеке:

- ▶ `ConcurrentDictionary<K, V>`
- ▶ `BlockingCollection<T>`
- ▶ `ConcurrentBag<T>`
- ▶ `ConcurrentQueue<T>`
- ▶ `ConcurrentStack<T>`

Пример

```

var cq = new ConcurrentQueue<int>();

for (int i = 0; i < 10000; i++)
    cq.Enqueue(i);

if (!cq.TryPeek(out int result))
    Console.WriteLine("C TryPeek тут всё должно было быть ок");
else if (result != 0)
    Console.WriteLine($"Ожидалось 0, получили {result}");

int outerSum = 0;
Action action = () => {
    int localSum = 0;
    while (cq.TryDequeue(out int localValue))
        localSum += localValue;
    Interlocked.Add(ref outerSum, localSum);
};

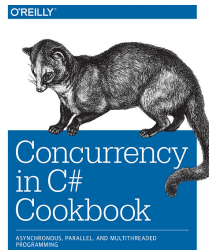
Parallel.Invoke(action, action, action, action);

Console.WriteLine($"outerSum = {outerSum}, should be 49995000");

```

Литература

Stephen Cleary, Concurrency in C# Cookbook, O'Reilly Media, 2014. 207PP.
Многие примеры взяты оттуда



Stephen Cleary