

Apress®

**Konrad Kokosa**

# **Zaawansowane zarządzanie pamięcią w .NET**

**Lepszy kod, wydajność  
i skalowalność**

przekład: Jakub Niedźwiedź

APN Promise, Warszawa 2020

# Spis treści

|  |      |
|--|------|
| <b>O autorze</b> .....                                       | xiii |
| <b>Podziękowania</b> .....                                   | xv   |
| <b>Przedmowa</b> .....                                       | xvii |
| <b>Wprowadzenie</b> .....                                    | xix  |
| <b>Rozdział 1. Podstawowe pojęcia</b> .....                  | 1    |
| <b>Terminy związane z pamięcią</b> .....                     | 3    |
| Alokacja statyczna .....                                     | 10   |
| Maszyna rejestrowa .....                                     | 11   |
| Stos .....   | 12   |
| Maszyna stosowa .....  | 19   |
| Wskaźnik .....   | 23   |
| Sterra .....   | 25   |
| <b>Ręczne zarządzanie pamięcią</b> .....                     | 28   |
| <b>Automatyczne zarządzanie pamięcią</b> .....               | 34   |
| Alokator, mutator i kolektor .....                           | 36   |
| <b>Zliczanie referencji</b> .....                            | 42   |
| <b>Kolektor śledzący</b> .....                               | 48   |
| Faza oznaczania (Mark) .....                                 | 49   |
| Faza zbierania (Collect) .....                               | 54   |
| <b>Nieco historii</b> .....                                  | 58   |
| <b>Podsumowanie</b> .....                                    | 61   |
| Zasada 1 – Ucz się .....                                     | 61   |
| <b>Rozdział 2. Niskopoziomowe zarządzanie pamięcią</b> ..... | 63   |
| <b>Sprzęt</b> .....  | 64   |
| Pamięć .....   | 71   |
| Procesor (CPU) .....   | 73   |
| <b>System operacyjny</b> .....                               | 94   |
| Pamięć wirtualna .....                                       | 94   |
| Duże strony .....  | 99   |
| Fragmentacja pamięci wirtualnej .....                        | 100  |

## Spis treści

|  |            |
|--|------------|
| Ogólny układ pamięci .....   | 101        |
| Zarządzanie pamięcią w Windows .....   | 103        |
| Układ pamięci systemu Windows .....  | 109        |
| Zarządzanie pamięcią w systemie Linux .....                                    | 112        |
| Układ pamięci w systemie Linux .....   | 114        |
| Wpływ systemu operacyjnego .....   | 116        |
| <b>NUMA i grupy procesorów .....</b>   | <b>117</b> |
| <b>Podsumowanie .....</b>  | <b>119</b> |
| Zasada 2 – Należy unikać losowego dostępu, a promować dostęp sekwencyjny ..... | 119        |
| Zasada 3 – Poprawiaj przestrzenną i czasową lokalność danych .....             | 120        |
| Zasada 4 – Używaj bardziej zaawansowanych możliwości .....                     | 121        |
| <b>Rozdział 3. Pomiary pamięci .....</b>                                       | <b>123</b> |
| <b>Mierzyć wcześniej .....</b>   | <b>125</b> |
| Obciążenie i inwazyjność .....   | 126        |
| Próbkowanie i śledzenie .....  | 126        |
| Drzewo wywołań .....   | 127        |
| Grafy obiektów .....   | 128        |
| Statystyki .....   | 130        |
| Opóźnienie a przepustowość .....   | 134        |
| Zrzuty pamięci, śledzenie, debugowanie na żywo .....                           | 136        |
| <b>Środowisko systemu Windows .....</b>  | <b>137</b> |
| Przegląd .....   | 137        |
| VMMMap .....   | 138        |
| Liczniki wydajności .....  | 139        |
| Śledzenie zdarzeń dla systemu Windows .....                                    | 146        |
| Zestaw narzędzi Windows Performance Toolkit .....                              | 160        |
| PerfView .....   | 173        |
| ProcDump, DebugDiag .....  | 184        |
| WinDbg .....   | 185        |
| Deasemblerzy i dekompilatory .....   | 188        |
| BenchmarkDotNet .....  | 189        |
| Narzędzia komercyjne .....   | 191        |
| <b>Środowisko Linux .....</b>  | <b>202</b> |
| Przegląd .....   | 202        |
| Perfcollect .....  | 204        |
| Trace Compass .....  | 206        |
| Zrzuty pamięci .....   | 217        |
| <b>Podsumowanie .....</b>  | <b>219</b> |
| Zasada 5 – Mierz odśmiecanie pamięci wcześniej .....                           | 221        |

|  |     |
|--|-----|
| <b>Rozdział 4. Podstawy .NET</b> .....   | 223 |
| <b>Wersje .NET</b> .....   | 224 |
| <b>Wewnętrzne mechanizmy .NET</b> .....  | 227 |
| Dogłębna analiza przykładowego programu .....                                  | 231 |
| <b>Podzespoły i domeny aplikacji</b> .....                                     | 238 |
| Usuwalne podzespoły .....  | 240 |
| <b>Regiony pamięci procesu</b> .....   | 241 |
| Scenariusz 4-1. Jak dużo pamięci zajmuje mój program? .....                    | 247 |
| Scenariusz 4-2. Zużycie pamięci przez nasz program stale rośnie .....          | 249 |
| Scenariusz 4-3. Zużycie pamięci przez nasz program stale rośnie .....          | 252 |
| Scenariusz 4-4. Zużycie pamięci przez nasz program stale rośnie .....          | 255 |
| <b>System typów</b> .....  | 259 |
| Kategorie typów .....  | 259 |
| Przechowywanie typów .....   | 262 |
| Typy wartościowe .....   | 263 |
| Typy referencyjne .....  | 273 |
| <b>Łańcuchy znaków</b> .....   | 281 |
| Internowanie łańcuchów znaków .....  | 288 |
| Scenariusz 4-5. Zużycie pamięci przez nasz program jest zbyt duże .....        | 295 |
| <b>Opakowywanie i rozpakowywanie</b> .....                                     | 298 |
| <b>Przekazywanie przez referencję</b> .....                                    | 304 |
| Przekazywanie wystąpienia typu wartościowego przez referencję .....            | 304 |
| Przekazywanie wystąpienia typu referencyjnego przez referencję .....           | 306 |
| <b>Lokalność danych dla typów</b> .....  | 307 |
| <b>Dane statyczne</b> .....  | 311 |
| Pola statyczne .....   | 311 |
| Wewnętrzne działanie danych statycznych .....                                  | 312 |
| <b>Podsumowanie</b> .....  | 318 |
| Struktury .....  | 318 |
| Klasy .....  | 319 |
| <b>Rozdział 5. Partycjonowanie pamięci</b> .....                               | 323 |
| <b>Strategie partycjonowania</b> .....   | 324 |
| <b>Partycjonowanie według rozmiaru</b> .....                                   | 326 |
| Serta małych obiektów .....  | 328 |
| Serta dużych obiektów .....  | 328 |
| <b>Partycjonowanie ze względu na czas życia</b> .....                          | 333 |
| Scenariusz 5-1. Czy mój program jest zdrowy? Rozmiary generacji w czasie ..... | 339 |
| Pamiętane zbiory .....   | 344 |
| Tabele kart .....  | 350 |
| Pakiety kart .....   | 357 |

|   |     |
|---|-----|
| <b>Partycjonowanie fizyczne</b> .....   | 360 |
| Scenariusz 5-2. Wyciek pamięci w nopCommerce? .....   | 367 |
| Scenariusz 5-3. Marnowanie miejsca w stercie dużych obiektów? .....                             | 378 |
| Anatomia segmentów i sterty .....   | 380 |
| Ponowne wykorzystanie segmentów .....   | 383 |
| <b>Podsumowanie</b> .....   | 387 |
| Zasada 11 – Monitoruj rozmiary generacji .....  | 387 |
| Zasada 12 – Unikaj niepotrzebnych referencji na stercie .....                                   | 388 |
| Zasada 13 – Monitoruj użycie segmentów .....  | 389 |
| <b>Rozdział 6. Alokacja pamięci</b> .....   | 391 |
| <b>Wprowadzenie do alokacji</b> .....   | 392 |
| <b>Alokacja z przesuwaniem wskaźnika</b> .....  | 393 |
| <b>Alokacja oparta na liście wolnych obszarów</b> .....   | 401 |
| <b>Tworzenie nowego obiektu</b> .....   | 406 |
| Alokacja na stercie małych obiektów .....   | 408 |
| Alokacja na stercie dużych obiektów .....   | 412 |
| <b>Równoważenie stert</b> .....   | 416 |
| <b>Wyjątek OutOfMemoryException</b> .....   | 420 |
| Scenariusz 6-1. Brak pamięci .....  | 421 |
| <b>Alokacje na stosie</b> .....   | 424 |
| <b>Unikanie alokacji</b> .....  | 426 |
| Jawne alokacje typów referencyjnych .....   | 428 |
| Ukryte alokacje .....   | 458 |
| Różne ukryte alokacje wewnątrz bibliotek .....  | 468 |
| Scenariusz 6-2. Badanie alokacji .....  | 474 |
| Scenariusz 6-3. Azure Functions .....   | 478 |
| <b>Podsumowanie</b> .....   | 479 |
| Zasada 14 – Unikaj alokacji na stercie na ścieżkach kodu krytycznych ze względu na wydajność .. | 480 |
| Zasada 15 – Unikaj nadmiernych alokacji na stercie LOH .....                                    | 480 |
| Zasada 16 – Preferuj alokacje na stosie, gdy jest to właściwe .....                             | 481 |
| <b>Rozdział 7. Wprowadzenie do odświeżania pamięci</b> .....                                    | 483 |
| <b>Widok wysokopoziomowy</b> .....  | 484 |
| <b>Proces odświeżania pamięci na przykładzie</b> .....  | 485 |
| <b>Kroki procesu odświeżania pamięci</b> .....  | 493 |
| Scenariusz 7-1. Analizowanie wykorzystania odświeżania pamięci .....                            | 494 |
| <b>Profilowanie odświeżania pamięci</b> .....   | 499 |
| <b>Dane dostrajające wydajność odświeżania pamięci</b> .....                                    | 501 |
| Dane statyczne .....  | 501 |
| Dane dynamiczne .....   | 504 |
| Scenariusz 7-2. Zrozumienie budżetu alokacji .....  | 508 |

|   |     |
|---|-----|
| <b>Wyzwalacze odśmiecania</b> .....   | 519 |
| Wyzwalanie przez alokację .....   | 520 |
| Wyzwalanie jawne .....  | 521 |
| Scenariusz 7-3. Analizowanie jawnych wywołań odśmiecania pamięci .....                | 526 |
| Wyzwalacz systemowy przy niskim poziomie pamięci .....                                | 533 |
| Różne wyzwalacze wewnętrzne .....   | 534 |
| <b>Wstrzymywanie silnika wykonawczego</b> .....                                       | 535 |
| Scenariusz 7-4. Analizowanie czasów wstrzymania .....                                 | 538 |
| <b>Generacja do skazania</b> .....  | 540 |
| Scenariusz 7-5. Analiza skazanych generacji .....                                     | 544 |
| <b>Podsumowanie</b> .....   | 546 |
| <b>Rozdział 8. Odśmiecanie pamięci – faza oznaczania</b> .....                        | 547 |
| <b>Przechodzenie przez graf obiektów i oznaczanie</b> .....                           | 547 |
| <b>Korzenie w zmiennych lokalnych</b> .....   | 549 |
| Przechowywanie zmiennych lokalnych .....  | 550 |
| Korzenie na stosie .....  | 551 |
| Zakres leksykalny .....   | 552 |
| Żywe korzenie na stosie a zakres leksykalny .....                                     | 553 |
| Żywe korzenie na stosie z gorliwym odśmiecaniem korzeni (eager root collection) ..... | 555 |
| Informacje GC .....   | 563 |
| Przypięte zmienne lokalne .....   | 569 |
| Skanowanie korzeni na stosie .....  | 572 |
| <b>Korzenie finalizacji</b> .....   | 573 |
| <b>Wewnętrzne korzenie GC</b> .....   | 574 |
| <b>Korzenie uchwytów GC</b> .....   | 575 |
| <b>Obsługa wycieków pamięci</b> .....   | 584 |
| Scenariusz 8-1. Wyciek pamięci w nopCommerce? .....                                   | 586 |
| Scenariusz 8-2. Identyfikowanie najpopularniejszych korzeni .....                     | 590 |
| <b>Podsumowanie</b> .....   | 593 |
| <b>Rozdział 9. Odśmiecanie pamięci – faza planowania</b> .....                        | 595 |
| <b>Sterta małych obiektów</b> .....   | 596 |
| Zaśleпки (plugs) i luki (gaps) .....  | 596 |
| Scenariusz 9-1. Zrzut pamięci z nieprawidłowymi strukturami .....                     | 602 |
| Tabela klocków (brick table) .....  | 604 |
| Przypinanie .....   | 606 |
| Scenariusz 9-2. Badanie przypinania .....   | 612 |
| Granice generacji .....   | 618 |
| Degradowanie .....  | 619 |
| <b>Sterta dużych obiektów</b> .....   | 624 |
| Zaśleпки i luki .....   | 624 |

## Spis treści

|   |            |
|---|------------|
| Decydowanie o kompaktowaniu .....   | 627        |
| Podsumowanie .....  | 629        |
| <b>Rozdział 10. Odśmiecianie pamięci – zmiatanie i kompaktowanie .....</b>        | <b>631</b> |
| <b>Faza zmiatania .....</b>   | <b>631</b> |
| Serta małych obiektów .....   | 632        |
| Serta dużych obiektów .....   | 633        |
| <b>Faza kompaktowania .....</b>   | <b>634</b> |
| Serta małych obiektów .....   | 634        |
| Serta dużych obiektów .....   | 640        |
| Scenariusz 10-1 Fragmentacja sterty dużych obiektów .....                         | 640        |
| <b>Podsumowanie .....</b>   | <b>651</b> |
| Zasada 17 – Obserwuj wstrzymania środowiska uruchomieniowego .....                | 652        |
| Zasada 18 – Unikaj „kryzysu wieku średniego” .....                                | 653        |
| Zasada 19 – Unikaj fragmentacji w starej generacji i na stercie LOH .....         | 654        |
| Zasada 20 – Unikaj jawnego odśmieciania pamięci .....                             | 655        |
| Zasada 21 – Unikaj wycieków pamięci .....   | 655        |
| Zasada 22 – Unikaj przypinania .....  | 656        |
| <b>Rozdział 11. Odmiany odśmieciania pamięci .....</b>                            | <b>659</b> |
| <b>Przegląd trybów .....</b>  | <b>659</b> |
| Tryb stacji roboczej a tryb serwera .....   | 659        |
| Tryb niewspółbieżny a współbieżny .....   | 662        |
| <b>Konfiguracja trybów .....</b>  | <b>663</b> |
| Platforma .NET Framework .....  | 664        |
| Platforma .NET Core .....   | 665        |
| <b>Przerwa na odśmiecianie pamięci i obciążenie procesora .....</b>               | <b>667</b> |
| <b>Opisy trybów .....</b>   | <b>670</b> |
| Niewspółbieżny tryb stacji roboczej (Workstation Non-Concurrent) .....            | 670        |
| Współbieżny tryb stacji roboczej (Workstation Concurrent, przed wersją 4.0) ..... | 672        |
| Tryb stacji roboczej w tle (Background Workstation) .....                         | 674        |
| Niewspółbieżny tryb serwera (Server Non-Concurrent) .....                         | 685        |
| Tryb serwera w tle (Background Server) .....                                      | 687        |
| <b>Tryby opóźnień (latency modes) .....</b>                                       | <b>689</b> |
| Tryb wsadowy .....  | 690        |
| Tryb interakcyjny .....   | 690        |
| Niskie opóźnienie .....   | 691        |
| Trwałe niskie opóźnienie .....  | 692        |
| Region bez odśmieciania pamięci .....   | 694        |
| Cele optymalizacji opóźnień .....   | 697        |
| <b>Wybieranie odmiany odśmieciania pamięci .....</b>                              | <b>698</b> |
| Scenariusz 11-1. Sprawdzanie ustawień odśmieciania pamięci .....                  | 700        |

|  |            |
|--|------------|
| Scenariusz 11-2. Testowanie różnych trybów odśmiecania pamięci ..... | 703        |
| Zasada 23 – Świadomie wybieraj tryb odśmiecania pamięci .....        | 712        |
| Zasada 24 – Pamiętaj o trybach opóźnień .....                        | 713        |
| <b>Rozdział 12. Czas życia obiektów .....</b>                        | <b>715</b> |
| <b>Cykl życia obiektów i zasobów .....</b>                           | <b>716</b> |
| <b>Finalizacja .....</b>   | <b>718</b> |
| Wprowadzenie .....   | 718        |
| Problem z gorliwym odśmiecaniem korzeni .....                        | 724        |
| Finalizatory krytyczne .....   | 728        |
| Wewnętrzne działanie finalizacji .....                               | 729        |
| Scenariusz 12-1. Wyciek pamięci przy finalizacji .....               | 739        |
| Wskrzeszanie .....   | 747        |
| <b>Obiekty wykorzystujące wzorzec Disposable .....</b>               | <b>751</b> |
| <b>Bezpieczne uchwyty (safe handles) .....</b>                       | <b>759</b> |
| <b>Słabe referencje .....</b>  | <b>766</b> |
| Buforowanie (caching) .....  | 772        |
| Wzorzec słabych zdarzeń .....  | 775        |
| Scenariusz 12-2. Wyciek pamięci z powodu zdarzeń .....               | 783        |
| <b>Podsumowanie .....</b>  | <b>786</b> |
| Zasada 25 – Unikaj finalizatorów .....                               | 787        |
| Zasada 26 – Preferuj jawne czyszczenie .....                         | 788        |
| <b>Rozdział 13. Różnorodne zagadnienia .....</b>                     | <b>791</b> |
| <b>Uchwyty zależne .....</b>   | <b>792</b> |
| <b>Pamięć lokalna wątku .....</b>                                    | <b>799</b> |
| Pola statyczne wątku .....   | 800        |
| Sloty na dane wątku .....  | 804        |
| Wewnętrzne działanie pamięci lokalnej wątku .....                    | 805        |
| Scenariusze użycia .....   | 814        |
| <b>Wskaźniki zarządzane .....</b>                                    | <b>815</b> |
| Zmienne lokalne ref .....  | 817        |
| Zwracane wartości ref .....  | 818        |
| Zmienne ref tylko do odczytu i parametry in .....                    | 820        |
| Wewnętrzne działanie typów ref .....                                 | 826        |
| Wskaźniki zarządzane w C# – zmienne ref .....                        | 841        |
| <b>Więcej na temat struktur .....</b>                                | <b>849</b> |
| Struktury tylko do odczytu .....                                     | 850        |
| Struktury ref (typy w rodzaju byref) .....                           | 852        |
| Bufory o stałych rozmiarach .....                                    | 855        |
| <b>Układ obiektów/struktur .....</b>                                 | <b>860</b> |



## Spis treści

|   |      |
|---|------|
| <b>Ograniczenie unmanaged</b> .....                   | 873  |
| Typy kopiowalne (blittable) .....                     | 879  |
| <b>Podsumowanie</b> .....                             | 882  |
| <b>Rozdział 14. Techniki zaawansowane</b> .....       | 883  |
| <b>Span&lt;T&gt; i Memory&lt;T&gt;</b> .....          | 883  |
| Span<T> .....   | 884  |
| Memory<T> .....                                       | 903  |
| IMemoryOwner<T> .....                                 | 907  |
| Wewnętrzne działanie Memory<T> .....                  | 913  |
| Wskazówki dotyczące Span<T> i Memory<T> .....         | 916  |
| <b>Typ Unsafe</b> .....                               | 916  |
| Wewnętrzne działanie Unsafe .....                     | 923  |
| <b>Projektowanie zorientowane na dane</b> .....       | 924  |
| Projektowanie taktyczne .....                         | 926  |
| Projektowanie strategiczne .....                      | 930  |
| <b>Więcej na temat przyszłości</b> .....              | 943  |
| Typy referencyjne dopuszczające wartość null .....    | 943  |
| Potoki .....  | 951  |
| <b>Podsumowanie</b> .....                             | 959  |
| <b>Rozdział 15. Programowe interfejsy API</b> .....   | 961  |
| <b>Interfejs API dla odśmiecania pamięci</b> .....    | 962  |
| Dane i statystyki dotyczące odśmiecania pamięci ..... | 962  |
| Powiadomienia ze strony odśmiecania pamięci .....     | 973  |
| Kontrolowanie obciążenia pamięci niezarządzanej ..... | 976  |
| Jawne odśmiecanie .....                               | 976  |
| Regiony bez odśmiecania pamięci .....                 | 977  |
| Zarządzanie finalizacją .....                         | 977  |
| Użycie pamięci .....                                  | 977  |
| Wewnętrzne wywołania w klasie GC .....                | 979  |
| <b>Hosting środowiska uruchomieniowego CLR</b> .....  | 980  |
| <b>ClrMD</b> .....                                    | 992  |
| <b>Biblioteka TraceEvent</b> .....                    | 1000 |
| <b>Niestandardowe odśmiecanie pamięci</b> .....       | 1003 |
| <b>Podsumowanie</b> .....                             | 1008 |
| <b>Indeks</b> .....                                   | 1011 |